



Diogo Peres Soares Fernandes

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Optimização do Desempenho de uma Máquina de Corte por Jacto de Água

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2016

Optimização do Desempenho de uma Máquina de Corte por Jacto de Água

Copyright © 2016 Diogo Peres Soares Fernandes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Dedico esta dissertação aos meus pais. A quem agradeço todos os esforços que fizeram por mim ao longo de todo o meu percurso académico, para que este momento fosse possível. O meu eterno obrigado.

Agradeço ao Professor Doutor António José Freire Mourão pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela orientação e pela disponibilidade sempre demonstrada para me auxiliar ao longo desta dissertação.

Agradeço aos funcionários da empresa, em especial a Jorge Costinha e ao Sousa, por toda a ajuda prestada e por terem tornado possível esta dissertação.

Por fim agradecer a todos os amigos, de curso e do futsal da AEFCT, que me acompanharam ao longo destes cinco anos. Um agradecimento especial aos restantes “Moscãoteiros” que se mostraram amigos para a vida.

A todos, o meu grande obrigado.

Resumo

Esta dissertação insere-se num trabalho de optimização do desempenho de uma máquina de corte por jacto de água, cujo principal objectivo é a definição das condições de funcionamento mais favoráveis do equipamento.

Para tal, foi realizada uma análise do estado da arte donde se concluiu que esta optimização teria de ser alcançada pela via experimental. O primeiro passo para a realização desta optimização foi a definição das metodologias a utilizar: metodologia de superfície de resposta (RSM) com o planeamento de experiências (DoE) adequado.

A aplicação destas metodologias pressupôs o conhecimento do equipamento alvo deste estudo, bem como quais as suas condições de funcionamento actuais e quais os parâmetros passíveis de serem alterados com vista à optimização.

Após adquirida toda esta informação, foram aplicadas as metodologias recorrendo a experiências simuladas utilizando os softwares da máquina. Finda esta simulação foram obtidos resultados que careciam de uma validação experimental. Assim, foi conduzido um conjunto de experiências onde se maquinaram peças na máquina de corte por jacto de água. As peças foram posteriormente analisadas e os resultados confrontados com os obtidos na simulação.

Foi possível alcançar um conjunto de resultados que cumprem o objectivo proposto de optimizar o funcionamento do equipamento. Já que, após este trabalho de optimização, foi possível aumentar a produtividade do equipamento (em cerca de 16% num exemplo estudado), reduzir custos (aproximadamente 14%, para o mesmo exemplo) e aumentar a qualidade das peças maquinadas.

Palavras-chave: Optimização, Planeamento de Experiências, Metodologia de Superfície de Resposta, Corte por Jacto de Água

Abstract

This thesis is based on the performance optimization of an abrasive water jet machine, the main aim is to define the most favorable operating conditions of the said equipment.

In order to do so, a study of the state of the art was conducted. From which was concluded that the optimization was only going to be accomplished via the experimental root. The first step in this optimization is to define which methodologies will be used. In this case, the study will be conducted by using Response Surface Methodology (RSM) with the adequate Design of Experiments (DoE).

The use of those methodologies implies the knowledge of the equipment as well as the current operating conditions and the parameters that we are able to change in order to optimize the machine.

After acquired all this information, the methodologies were then applied resourcing to simulated experiences using the machine's softwares. Once finished this simulation, the obtained results lacked an experimental validation. So, a set of experiments, consisting on machining some parts using the water jet cutting machine, were conducted. The parts were then analyzed and the results were compared with the ones obtained from the simulation.

We can now conclude that it was possible to obtain results that accomplish the set goal of optimizing the performance of the water jet cutting machine. With this optimization we were able to increase the machine's productivity (by around 16% on a given case), reduce costs (by around 14% on the same case) and improve the parts' quality.

Keywords: Optimization, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Water Jet Cutting

Índice de Matérias

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJECTIVOS	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	1
2. CORTE POR JACTO DE ÁGUA – ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 BREVE NOTA HISTÓRICA	3
2.2 ENQUADRAMENTO	3
2.3 ÁREAS DE APLICAÇÃO	4
2.4 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	5
2.5 PARÂMETROS	9
2.5.1 ESPESSURA DE CORTE	11
2.5.2 RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE.....	12
2.5.3 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	13
2.5.4 GEOMETRIA DE <i>KERF</i>	14
2.5.5 DESGASTE DO BOCAL	15
2.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	15
2.7 CUSTOS HORÁRIOS DE FUNCIONAMENTO	16
2.8 ANÁLISE SINTÉTICA.....	17
3. METODOLOGIAS DE TRABALHO	19
3.1 SEQUÊNCIA DOS TRABALHOS	19
3.2 PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS	19
3.3 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	20
3.4 PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIA DE BOX BEHNKEN	21
3.5 ANÁLISE DA VARIÂNCIA.....	22

4. EQUIPAMENTO UTILIZADO	23
4.1 SISTEMA DE FILTRAGEM DE ÁGUA	23
4.2 SISTEMA DE ARREFECIMENTO DE ÁGUA	24
4.3 BOMBA HIDRÁULICA	24
4.4 MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA – <i>MAXIEM 1530</i>	25
4.5 TANQUE DE ABRASIVOS	25
4.6 SOFTWARES <i>OMAX MAKE</i> E <i>OMAX LAYOUT</i>	26
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
5.1 EXPERIÊNCIAS SIMULADAS	29
5.1.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E RESPOSTAS A ESTUDAR.....	29
5.1.2 REALIZAÇÃO DO DoE.....	31
5.1.2.1 TEMPO DE MAQUINAGEM.....	34
5.1.2.2 QUANTIDADE DE ABRASIVOS UTILIZADOS	37
5.1.2.3 CUSTO.....	40
5.1.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	42
5.1.3.1 AUMENTO DA CAPACIDADE DE CORTE ANUAL E POUPANÇA ANUAL	44
5.2 REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS	45
5.2.1 PREPARAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS	45
5.2.2 ANÁLISE GEOMÉTRICA DAS PEÇAS MAQUINADAS	47
5.2.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	49
6. CONCLUSÕES.....	51
6.1 CONCLUSÕES	51
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
8. ANEXOS.....	57

Índice de Figuras

FIG. 2.1: CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MAQUINAÇÃO NÃO CONVENCIONAIS	3
FIG. 2.2: A) CORTE POR JACTO DE ÁGUA PURO, B) CORTE POR JACTO DE ÁGUA ABRASIVO.....	4
FIG. 2.3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA	5
FIG. 2.4: FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA DE ACCIONAMENTO DIRECTO	6
FIG. 2.5: FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA INTENSIFICADORA	6
FIG. 2.6: VISTA DE CORTE DE UMA CABEÇA DE CORTE	7
FIG. 2.7: ZONA DE MISTURA DO JACTO DE ÁGUA COM OS ABRASIVOS	8
FIG. 2.8: GRANADA 80 MESH (ESQ.), VISTA MICROSCÓPICA DE GRANADA (DRT.).....	8
FIG. 2.9: MESA (CATCHER) DE UMA MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA	9
FIG. 2.10: A) DANIFICAÇÃO DAS RIPAS DA MESA, B) RESÍDUOS ACOMULADOS	9
FIG. 2.11: PARÂMETROS QUE AFECTAM O CORTE POR JACTO DE ÁGUA.	10
FIG. 2.12: KERF RESULTANTE DO CORTE UM MATERIAL POR JACTO DE ÁGUA.....	14
FIG. 2.13: (A) DEFLEXÃO DO JACTO DE ÁGUA. (B) DEFEITO NO CANTO DE UMA PEÇA CAUSADO PELO ATRASO DO JACTO DE ÁGUA.	16
FIG. 3.1: REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO.	20
FIG. 3.2: REPRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA BOX-BEHNKEN PARA 3 FACTORES.....	22
FIG. 4.1: SISTEMA DE FILTRAGEM DE ÁGUA.	23
FIG. 4.2: CHILLER PARA ARREFECIMENTO DE ÁGUA.	24
FIG. 4.3: BOMBA HIDRÁULICA.	24
FIG. 4.4: MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA – MAXIEM 1530.	25
FIG. 4.5: A) TANQUE DE ABRASIVOS; B) LIGAÇÃO DO TANQUE DE ABRASIVOS AO HOPPER.....	25
FIG. 4.6: COMPUTADOR UTILIZADO PARA CONTROLAR O FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA.	26
FIG. 4.7: SOFTWARE OMAX LAYOUT.	27
FIG. 4.8: SOFTWARE OMAX MAKE.	27
FIG. 4.9: RESPOSTAS OBTIDAS COM O SOFTWARE OMAX MAKE.	28
FIG. 5.1: A) ORIFÍCIOS DISPONÍVEIS PARA AJUSTE DO FLUXO DE ABRASIVOS. B) ENCAIXE DOS ORIFÍCIOS NO HOPPER.	30
FIG. 5.2: DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE ABRASIVOS ASSOCIADO A CADA ORIFÍCIO.....	30
FIG. 5.3: GRÁFICOS DE INTERACÇÃO ENTRE OS DIFERENTES PARÂMETROS PARA A RESPOSTA TEMPO.	34
FIG. 5.4: GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA A RESPOSTA TEMPO.	35
FIG. 5.5: GRÁFICOS DE CONTORNO PARA A RESPOSTA TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PRESSÃO E FLUXO DE ABRASIVOS PARA ESPESSURA DE A) 5MM, B) 12.5MM E C) 20MM.....	36
FIG. 5.6: GRÁFICOS DE INTERACÇÃO ENTRE OS DIFERENTES PARÂMETROS PARA A RESPOSTA QUANTIDADE DE ABRASIVOS.	38
FIG. 5.7: GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA A RESPOSTA QUANTIDADE DE ABRASIVOS..	38

FIG. 5.8: GRÁFICOS DE CONTORNO PARA A RESPOSTA QUANTIDADE DE ABRASIVOS EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PRESSÃO E FLUXO DE ABRASIVOS PARA ESPESSURA DE A) 5MM, B) 12.5MM E C) 20MM.	39
FIG. 5.9: GRAFICOS DE INTERACÇÃO ENTRE OS DIFERENTES PARÂMETROS PARA A RESPOSTA CUSTO.	40
FIG. 5.10: GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA A RESPOSTA CUSTO.	41
FIG. 5.11: GRÁFICOS DE CONTORNO PARA A RESPOSTA CUSTO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PRESSÃO E FLUXO DE ABRASIVOS PARA ESPESSURA DE A) 5MM, B) 12.5MM E C) 20MM.....	41
FIG. 5.12: MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO E LARGURA DAS PEÇAS MAQUINADAS.	47
FIG. 5.13: MEDIÇÃO DA LARGURA DAS PEÇAS MAQUINADAS	47
FIG. 5.14: PEÇAS MAQUINADAS	48
FIG. 5.15: MEDIÇÃO DE KERF RECORRENDO A UM MEDIDOR DE PERFIS.	48

Índice de Tabelas

TABELA 2.2.1: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA ESPESSURA DE CORTE.	12
TABELA 2.2.2: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE.	13
TABELA 2.2.3: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL.....	13
TABELA 2.2.4: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO <i>KERF</i>	15
TABELA 5.1: FLUXO DE ABRASIVOS ASSOCIADO A CADA ORIFÍCIO.	31
TABELA 5.2: NÍVEIS MÁXIMO, MÍNIMO E EM USO DOS PARÂMETROS FLUXO DE ABRASIVOS, PRESSÃO DE ÁGUA E ESPESSURA.	31
TABELA 5.3: NÍVEIS -1, 0 E 1 UTILIZADOS NA METODOLOGIA DE BOX-BEHNKEN.....	31
TABELA 5.4: SÍNTESE DAS EXPERIÊNCIAS SIMULADAS COM O MATERIAL ALUMÍNIO.....	33
TABELA 5.5: VALORES DE TEMPO OBTIDOS UTILIZANDO A EQUAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES OBTIDOS NA MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA.	37
TABELA 5.6: VALORES DE QUANTIDADE DE ABRASIVOS OBTIDOS UTILIZANDO A EQUAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES OBTIDOS NA MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA. .	40
TABELA 5.7: VALORES DE CUSTO UTILIZANDO A EQUAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES OBTIDOS NA MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA.	42
TABELA 5.8: COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA AS RESPOSTAS TEMPO, QUANTIDADE DE ABRASIVOS E CUSTO UTILIZANDO OS PARÂMETROS OPTIMOS VERSUS OS PARÂMETROS EM USO.	43
TABELA 5.9: SÍNTESE DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS NA MAQUINAÇÃO DE PEÇAS.....	46
TABELA 5.10: VALORES DAS RESPOSTAS TEMPO, CUSTO E QUANTIDADE DE ABRASIVOS OBTIDOS NA MAQUINAÇÃO DAS PEÇAS PARA ESTUDO DA QUALIDADE.	46
TABELA 5.11: VALORES DE <i>KERF</i> , COMPRIMENTO E LARGURA OBTIDOS.....	49
TABELA 5.12: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DO JACTO DE ÁGUA E DO FLUXO DE ABRASIVOS NA PRECISÃO GEOMÉTRICA E <i>KERF</i>	50
TABELA 6.1: PARÂMETROS QUE OPTIMIZAM O DESEMPENHO DA MÁQUINA DE CORTE POR JACTO DE ÁGUA.	51
TABELA 6.2: VARIAÇÃO DE TEMPO DE MAQUINAGEM, O CUSTO, O <i>KERF</i> E PRECISÃO GEOMÉTRICA EM FUNÇÃO DA PRESSÃO, DO FLUXO DE ABRASIVOS E DA ESPESSURA	52

Nomenclatura

Símbolos

R^2	Valor de adequabilidade do modelo
x_P	Pressão em unidades codificadas
x_{FA}	Fluxo de abrasivos em unidades codificadas
x_E	Espessura em unidades codificadas
x	Largura menor
x'	Largura maior
\bar{X}	Largura média
y	Comprimento menor
y'	Comprimento maior
\bar{Y}	Comprimento médio
θ_x	<i>Kerf</i> ao longo da largura
θ_y	<i>Kerf</i> ao longo do comprimento
$\bar{\theta}$	<i>Kerf</i> médio

Siglas

ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
UNL	Universidade Nova de Lisboa
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
P	Pressão
E	Espessura
FA	Fluxo de Abrasivos

1. Introdução

1.1 Motivação

A principal motivação para a realização desta dissertação é a concretização do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica realizado na FCT-UNL. Esta dissertação será desenvolvida em ambiente empresarial, em articulação com uma empresa.

A empresa adquiriu recentemente uma máquina de corte por jacto de água. Porém, tem consciência que está a trabalhar com os parâmetros de funcionamento do fabricante e que tal está a conduzir a custos de funcionamento elevados. A motivação passa por utilizar todo o conhecimento adquirido ao longo dos 5 anos de mestrado para melhorar as condições de funcionamento desta máquina. Tal pressupõe a utilização de metodologias de trabalho.

Assim, esta dissertação de cariz prático e científico, em ambiente empresarial, tem como motivação a obtenção de resultados que possam ser aplicados com vista a melhorar o funcionamento da máquina, aumentando a produtividade e reduzindo os custos.

1.2 Objectivos

O principal objectivo desta dissertação é a melhoria das condições de funcionamento do equipamento alvo de estudo, neste caso uma máquina de corte por jacto de água. Tal pressupõe:

- Conhecimento do equipamento.
- Definição de uma abordagem.
- Definição de condições de experimentação.
- Sistematização de trabalho.
- Apresentação de resultados com cariz científico e que possam ser utilizados pela empresa.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, com os conteúdos a seguir indicados.

No Capítulo 1, de carácter introdutório, é apresentada a motivação para a realização desta dissertação, bem como os objectivos da mesma. É ainda feita a estruturação da presente dissertação.

O Capítulo 2, consiste numa revisão do estado da arte do corte por jacto de água, resultante de uma pesquisa bibliográfica. São apresentados os princípios básicos de funcionamento de uma máquina de corte por jacto de água bem como os parâmetros do mesmo, abordando assim temas fundamentais para a presente dissertação.

No Capítulo 3, são apresentadas as metodologias que serão utilizadas para alcançar os objectivos desta dissertação. Nomeadamente o planeamento de experiências (DoE) e a metodologia de superfície de resposta (RSM).

Já no Capítulo 4, são apresentados de forma detalhada todos os equipamentos constituintes da máquina de corte por jacto de água alvo de estudo nesta dissertação.

O Capítulo 5 é referente ao procedimento experimental. Nele são aplicadas as metodologias referidas no Capítulo 3, bem como são feitas experiências de validação de resultados que consistem na maquinação de algumas peças com a máquina de corte por jacto de água.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da presente dissertação bem como são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Corte por Jacto de Água – Estado da Arte

2.1 Breve Nota Histórica

Ao longo do tempo, a natureza tem-nos mostrado que a água é capaz de mudar a forma dos materiais, mesmo os mais resistentes. As primeiras aplicações de água a elevadas pressões datam do século XIX quando era usada, pelos mineiros de ouro na Califórnia, para remover camadas de areia e rocha [1].

Nos anos 60, o estudo do corte por jacto de água puro foi conduzido por O.Imanaka da Universidade de Tóquio. Em 1968, Norman Franz da Universidade de British Columbia no Canadá, patenteou um protótipo de uma máquina de corte por jacto de água a 700bar. No final dos anos 70, foram introduzidos os materiais compósitos e as suas vantagens como a elevada resistência e baixo peso aumentaram o seu uso na indústria. No entanto, não existia um método convencional para maquinar esses materiais de forma económica. Assim, nos anos 80, foram introduzidas partículas de materiais abrasivos no jacto de água possibilitando a maquinação de materiais duros como compósitos, vidros, cerâmicos ou aços [1] [2].

2.2 Enquadramento

Os processos de maquinação não convencionais podem ser classificados como mecânicos, térmicos, químicos ou electroquímicos (Fig. 2.1). O corte por jacto de água insere-se na classe de processos de maquinação não convencionais mecânicos.

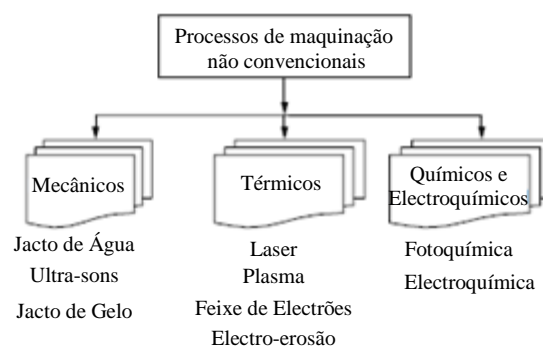


Fig. 2.1: Classificação dos processos de maquinação não convencionais (adaptado de [3]).

No corte por jacto de água, o material é removido por erosão devido a água a elevada pressão e velocidade, bem como ao impacto de partículas abrasivas que se deslocam a elevadas velocidades [4].

Podemos dividir o corte por jacto de água em dois grupos:

- Corte por jacto de água puro (Water Jet Machining - WJM), usado para materiais macios como têxteis, plásticos, esponjosos ou papel. O corte é efectuado por erosão devido à elevada velocidade do jacto de água;
- Corte por jacto de água abrasivo (Abrasive Water Jet Machining - AWJM), usado para materiais duros como cerâmicos, compósitos ou aços. O corte é efectuado por erosão devido à elevada velocidade das partículas abrasivas, a água serve apenas como um meio condutor dessas partículas [1].

A principal diferença entre os dois é a utilização, ou não, de partículas abrasivas (Fig. 2.2). A máquina em estudo nesta dissertação é uma máquina de corte por jacto de água abrasivo, assim, de aqui em diante, apenas será abordado o corte de jacto de água abrasivo. Este será referido, apenas, como corte por jacto de água.

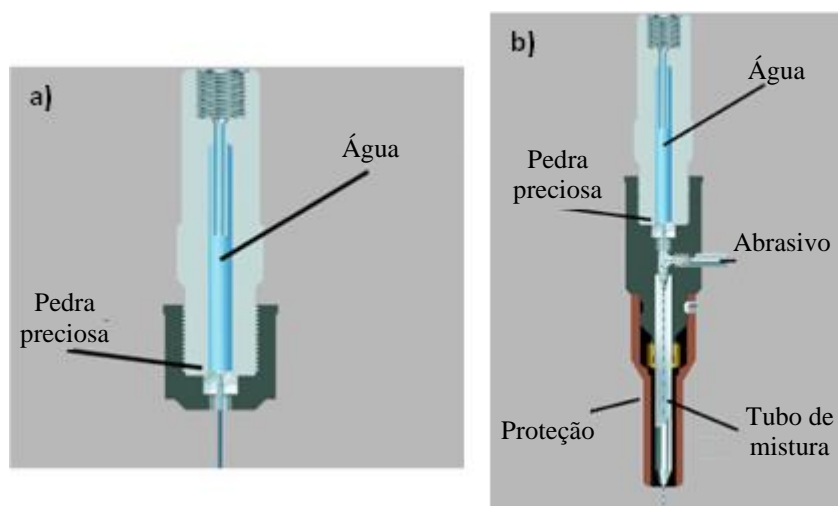


Fig. 2.2: a) Corte por jacto de água puro, b) Corte por jacto de água abrasivo (adaptado de [5]).

2.3 Áreas de Aplicação

De uma forma geral podemos separar a maquinação por jacto de água em 3 grupos: corte, furação e fresagem.

A operação de corte é de longe a mais utilizada. Uma grande variedade de matérias (desde papel a titânio) e de espessuras (de 1.6mm a 300mm) podem ser cortados utilizando o jacto de água. A velocidade de corte varia de material para material, no entanto cada material tem uma velocidade de corte óptima (o vidro é cortado duas vezes mais rápido que o alumínio e o titânio é cortado duas vezes mais lento do que o alumínio, por exemplo). A velocidade de corte diminui, também, com um aumento da espessura, no entanto tal não acontece de forma linear. No entanto, a operação de corte é utilizada para operações tão distintas como o corte de rochas ou o corte dos forros interiores dos automóveis.

A furação por corte de jacto de água é sobretudo utilizada em materiais difíceis de furar, utilizando outros processos, como cerâmicos ou compósitos de matriz metálica. O diâmetro mais comum do bocal de uma máquina de jacto de água é 1mm, assim, é esse o diâmetro mínimo de furo. Porém, é possível fazer furos com diâmetros de 0.5mm, uma vez que existem bocais com esse diâmetro. Contudo, o tamanho de grão deve ser reduzido, para 120 *mesh*, para a realização desses furos mais pequenos de forma a evitar o entupimento do bocal.

Já a fresagem é uma operação em crescimento, e é a menos utilizada destas três. A fresagem é possível uma vez que a profundidade de corte é regulável, ajustando alguns parâmetros como avanço (quanto maior o avanço menor a penetração) ou a pressão do jacto de água (a profundidade de corte aumenta com o aumento da pressão). Porém, as partículas abrasivas podem ficar embutidas nos materiais e em certas aplicações tal pode ser um problema. Nesses casos é feita a maquinação recorrendo a jacto de água puro ou utilizando abrasivos mais nobres como é o caso do nitrogénio líquido (quando a água entra em contacto com o nitrogénio líquido converte as partículas em gelo, essas partículas irão actuar como abrasivo) [6].

Existem no entanto outras aplicações, menos convencionais, para o jacto de água como a remoção de isolamento de fios eléctricos, impressão de placas de circuitos, tratamento superficial, corte de aço para ferramentas, corte de madeira, corte de alimentos, remoção de rebites, remoção de tinta, entre outros [3][7].

2.4 Princípios de Funcionamento

Como referido anteriormente, no corte por jacto de água o material é removido por erosão devido à elevada velocidade das partículas abrasivas contidas no jacto de água (cerca de 900 m/s). Essa velocidade é conseguida fazendo passar água a elevadas pressões (cerca de 4000 bar) por um bocal de diâmetro reduzido (< 1 mm). Os principais componentes de um sistema de corte por jacto de água são uma bomba hidráulica, tubagem, abrasivos, cabeça de corte e uma mesa onde é posicionada a peça a ser maquinada. Uma representação esquemática deste sistema pode ser vista na Fig. 2.3 [8].

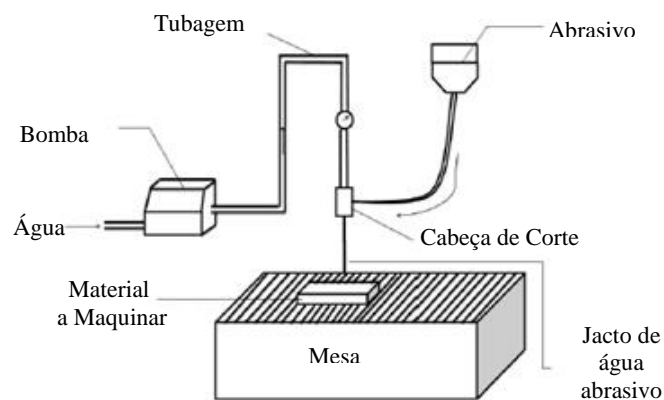


Fig. 2.3: Representação esquemática de um sistema de corte por jacto de água (adaptado de [8]).

- Bomba Hidráulica

A bomba hidráulica é o principal componente de um sistema de corte por jacto de água, uma vez que é responsável por pressurizar a água. Nos sistemas de corte por jacto de água podem ser utilizados dois tipos de bombas hidráulicas:

- Bombas de accionamento directo – A água é pressurizada através da acção de três êmbolos cerâmicos que são activados por um motor eléctrico (Fig. 2.4). A utilização destas bombas tem vindo a aumentar, muito devido à sua simplicidade. No entanto, a vasta maioria das bombas hidráulicas utilizadas são bombas intensificadoras [9].

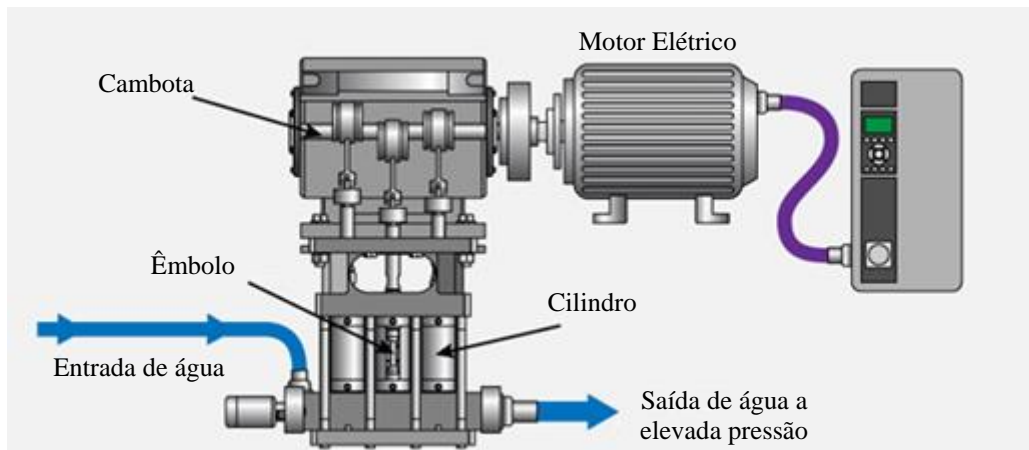


Fig. 2.4: Funcionamento de uma bomba hidráulica de accionamento directo (adaptado de [10]).

- Bombas intensificadoras – Nestas bombas existem dois fluídos, são eles a água a ser pressurizada e um óleo responsável por essa pressurização. Uma bomba hidráulica pressuriza o óleo a cerca de 3000 psi, o óleo necessita de estar a pressões elevadas pois vai ser ele o responsável por mover o pistão que irá forçar a água a sair por uma secção inferior, resultando num aumento de pressão da água. Este processo pode ser observado na Fig. 2.5 [9].

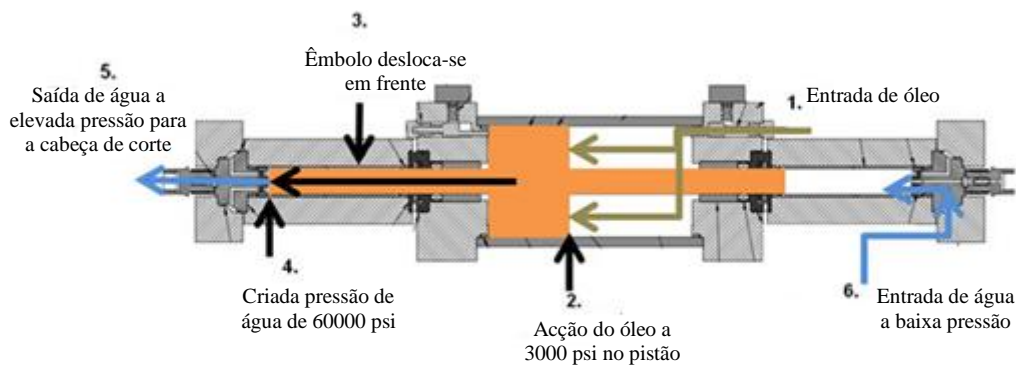


Fig. 2.5: Funcionamento de uma bomba hidráulica intensificadora (adaptado de [11]).

- Tubagem

Depois de pressurizada, é necessário transportar a água até à cabeça de corte. Além do transporte de água a tubagem tem, também, de garantir liberdade de movimentos à cabeça de corte. Assim, a tubagem tem de ser capaz de aguentar as elevadas pressões da água que transporta, bem como ser flexível para garantir a liberdade de movimentos. Para isso utiliza-se tubagem de aço com diferentes diâmetros dependendo do tipo de função a desempenhar. Os diâmetros variam entre 6 e 14 mm, sendo os menores diâmetros para as zonas finais da tubagem (que garantem a liberdade de movimento da cabeça de corte) e os maiores diâmetros para o transporte de água a elevada pressão (o grande diâmetro interno reduz as perdas de pressão) [3][9].

- Cabeça de Corte

A cabeça de corte é constituída por várias partes (Fig. 2.6), transformando assim a água a elevada pressão num jacto abrasivo que irá efectuar o corte.

A água a elevada pressão é feita passar por um material precioso (safira, rubi ou diamante, sendo a safira o mais utilizado) com um pequeno orifício, originando assim um jacto de água a elevada velocidade (normalmente Mach 2-3, 680 m/s e 1020 m/s respectivamente) [1].

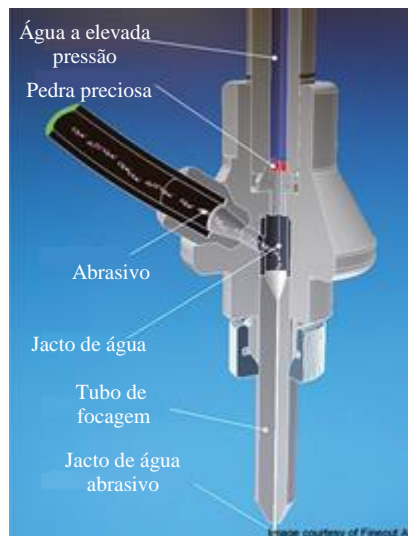


Fig. 2.6: Vista de corte de uma cabeça de corte (adaptado de [12]).

O jacto de água entra depois na chamada zona de mistura onde é adicionado o material abrasivo (Fig. 2.7). Esse jacto de água segue depois por um bocal onde a mistura continua a ser feita, e que serve também para focar o jacto de água. O diâmetro interior deste bocal tem, normalmente, cerca de 1mm. O bocal é normalmente feito de carboneto de tungsténio por se tratar de um material com elevada resistência abrasiva. Tal é necessário pois, até haver uma mistura perfeita entre o jacto de água e os abrasivos, pequenas partículas abrasivas são reflectidas do jacto de água para o bocal [9][13].

Associado a cada máquina de corte por jacto de água está um computador. É inserido um modelo em CAD (Computer Aided Design) num software do computador (este software varia de fabricante para fabricante) com o desenho que pretende ser maquinado. O software decide depois qual o ponto inicial e final, bem como a sequência de operações a realizar [3].

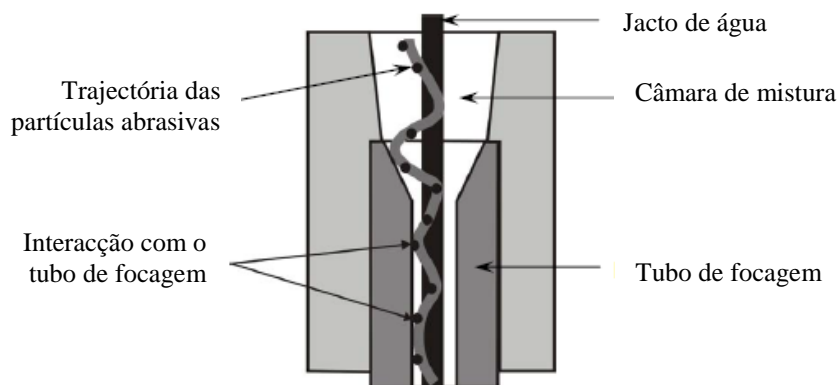


Fig. 2.7: Zona de mistura do jacto de água com os abrasivos (adaptado de [13]).

- Abrasivos

Como referido anteriormente, a adição de abrasivos no jacto de água é o que permite cortar materiais mais duros como cerâmicos, compósitos ou titânio, por exemplo. São utilizados abrasivos como granada (Fig. 2.8), carboneto de silício, óxido de alumínio ou sílica. No entanto, cerca de 90% da maquinação é feita utilizando granada como abrasivo [2].



Fig. 2.8: Granada 80 mesh (esq.), vista microscópica de granada (drt.)

O tamanho de grão do abrasivo varia ainda consoante o tipo de acabamento pretendido. Sendo 80 mesh o mais comum e utilizado na maioria das aplicações. 120 mesh é utilizado para excelente acabamento superficial enquanto 50 mesh permite um corte mais rápido que 80 mesh tendo, no entanto, um pior acabamento superficial [9].

Regra geral, os abrasivos não são recicláveis sendo escoados juntamente com as limalhas resultantes da operação de maquinação.

- Mesa (Catcher)

A mesa (Fig. 2.9) de uma máquina de corte por jacto de água serve não só como suporte do material a ser maquinado mas também como reservatório para os detritos gerados durante a maquinação. A mesa é constituída por ripas de aço inox e cheia com água. A presença de água ajuda a reduzir o ruído gerado na maquinação (cerca de 130 dB), bem como eventuais ressaltos do jacto de água. Com o uso, as ripas vão sendo danificadas (Fig. 2.10 a)) e como tal necessitam de ser trocadas periodicamente. A água vai também acumulando resíduos (Fig. 2.10 b)) da maquinação, como limalha e abrasivos. Como tal necessita, também ela, de ser mudada periodicamente [3][9].

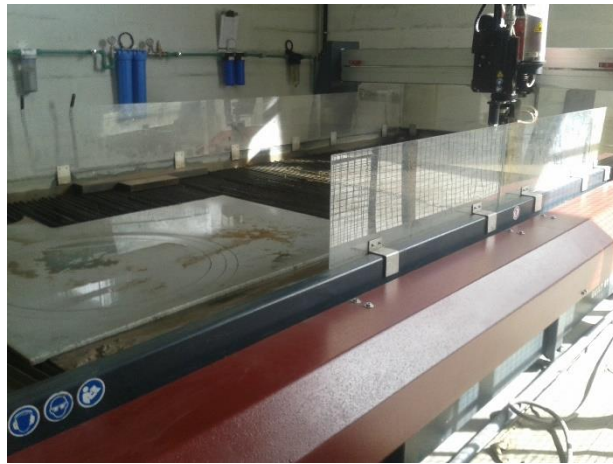


Fig. 2.9: Mesa (*catcher*) de uma máquina de corte por jacto de água

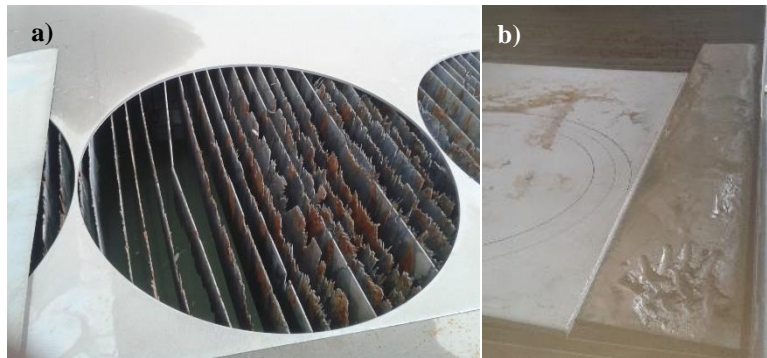


Fig. 2.10: a) Danificação das ripas da mesa, b) Resíduos acumulados

2.5 Parâmetros

A intensidade e eficiência do corte por jacto de água é afectada por diversos parâmetros de processo, estes podem ser divididos em hidráulicos, abrasivos, do material e de corte.

A espessura de corte, a rugosidade de superfície, a taxa de remoção de material, a geometria de *kerf* (ver Fig. 2.12) e o desgaste do bocal são referidos como parâmetros alvo e são afectados pelos parâmetros de processo utilizados no corte por jacto de água (Fig. 2.11) [14].

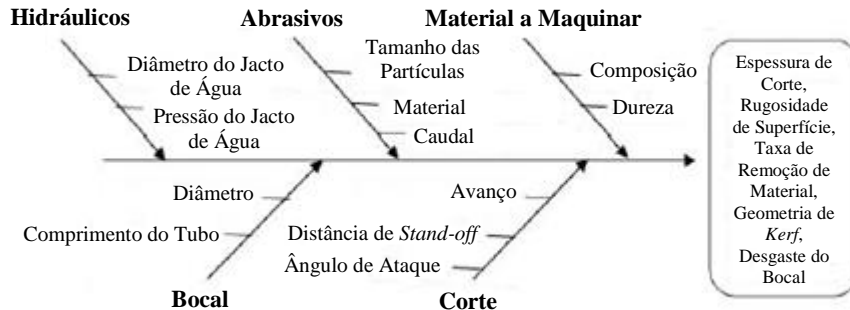


Fig. 2.11: Parâmetros que afectam o corte por jacto de água (adaptado de [14]).

- Parâmetros Hidráulicos

- Pressão do jacto de água – Varia, usualmente, entre 100 e 400 MPa [15].
- Diâmetro do jacto de água – Varia entre 0.5 e 1.5 mm, sendo normalmente cerca de 1mm [9].

- Parâmetros Abrasivos

- Tamanho das partículas – 120 mesh (100-200 µm), 80 mesh (150-300 µm) e 60 mesh (200-400 µm) [6].
- Material – Granada, carboneto de silício, óxido de alumínio ou sílica são os abrasivos mais comuns, sendo granada o mais comum [2].
- Caudal – Dado por:

$$\dot{V} = A \times \frac{h_i - h_f}{t} [mm^3/min]$$

A – Área de secção do contentor de abrasivos [mm²], h_i – Altura inicial de abrasivos [mm], h_f – Altura final de abrasivos [mm], t – Intervalo de tempo decorrido entre a medição de níveis de altura [min] [16].

- Parâmetros de Corte

- Distância de *Stand-off* – Distância entre o bocal (*nozzle*) e a peça a maquinar [mm].
- Ângulo de ataque – Ângulo entre o bocal e a peça a maquinar [°].
- Avanço – Velocidade relativa entre o bocal e a peça a maquinar [mm/min].

Os parâmetros de corte são os mais fáceis de alterar, uma vez que normalmente são programados no *software* da própria máquina. Nos parâmetros hidráulicos, a pressão de água pode ser mudada facilmente, no entanto pode não ser aconselhável uma vez que isso iria levar a mais manutenção e perda de eficiência visto que a máquina não estaria a operar à pressão

nominal. No que aos parâmetros abrasivos diz respeito, estes são alterados mudando o material ou, mantendo o mesmo material mudando o tamanho de grão.

Conhecidos os parâmetros de processo, irá agora ser abordada a forma como os parâmetros alvo são afectados pelos parâmetros de processo.

2.5.1 Espessura de Corte

Ayidin *et al.* [17] estudaram a influência dos parâmetros de processo na espessura de corte de rochas graníticas maquinadas por corte por jacto de água. Concluíram que a espessura de corte diminui com um aumento do avanço, tal deve-se ao facto de que quanto maior for a velocidade menos partículas, a um dado ponto, atingem o material.

Um aumento do caudal de abrasivos também leva ao aumento da espessura de corte, devido ao facto de o número de partículas em contacto com material aumentar. Porém, a relação entre aumento de caudal de abrasivos e aumento da espessura de corte não é linear uma vez que o aumento de caudal reduz a eficiência de corte das partículas individuais.

A distância de *stand-off* não tem influência na espessura de corte, um aumento de distância de *stand-off* leva a uma perda de energia do jacto, por outro lado esse aumento de distância leva a um aumento da área atingida pelo jacto.

Com um aumento da pressão do jacto de água a espessura de corte aumenta. No entanto, a partir de certo ponto, um aumento na pressão do jacto leva a uma menor espessura de corte. Isto deve-se ao facto de que quanto maior a pressão do jacto, maior é a largura de *kerf*. De salientar também que, quando maior a pressão do jacto, maior será a fragmentação das partículas abrasivas, reduzindo assim a eficiência das mesmas quando atingem o material.

Por fim, concluiu-se que quanto menor o tamanho de grão das partículas abrasivas menor será a espessura de corte. Isto acontece pois quanto maiores forem as partículas (maior tamanho de grão), maior será a sua energia cinética conseguindo assim maior energia no impacto com o material e consequente aumento da espessura de corte.

Os resultados obtidos por Ebeid *et al.* [18] para a influência do avanço, pressão do jacto de água, caudal de abrasivos e distância de *stand-off* confirmam os resultados obtidos por Ayidin *et al.*

Wang [19] estudou a influência do número de passagens do jacto de água na espessura. Concluiu que a espessura de corte aumenta com o número de passagens (apesar de a taxa de aumento de espessura de corte diminuir a cada passagem), assim o corte com múltiplas passagens pode ser utilizado para aumentar a capacidade e o domínio de aplicação do corte por jacto de água. Wang determinou que duas a três passagens seria o número ideal para conseguir melhores resultados do que com uma passagem única, em termos de produtividade. Porém, o

número de passagens pode ser aumentado caso o principal objectivo seja obter uma maior espessura de corte.

A Tabela 2.2.1. sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 2.2.1: Influência dos parâmetros de processo na espessura de corte [Aydin *et al.* e Wang].

	Avanço	Caudal de Abrasivos	Distância de <i>stand-off</i>	Pressão do Jacto de Água	Tamanho de Grão de Abrasivos	Número de Passagens
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Espessura de Corte	↓	↑	↑↓	↑↓	↑	↑
	↑ - Aumenta	↓ - Diminui	↑↓ - Inconclusivo	↑↓ - Inconclusivo		

2.5.2 Rugosidade de Superfície

Azmir e Ahsan [20] estudaram de que forma os parâmetros de processo influenciam rugosidade superficial de um compósito de vidro e *epoxy*. Começando pelo material utilizado como abrasivo, concluiu-se que a utilização de materiais com maior dureza, como óxido de alumínio ou carboneto de silício, reduz a rugosidade de superfície.

No que à pressão de jacto de água diz respeito, quanto maior a pressão, menor será a rugosidade superficial. Isto deve-se sobretudo ao aumento da energia cinética das partículas abrasivas que aumentam, consequentemente, a capacidade de remoção de material.

Um aumento da distância de *stand-off* permite que o jacto se expanda antes de atingir o material, aumentando assim a sua área de impacto (como referido anteriormente). Como tal, o diâmetro do jacto aumenta e consequentemente a energia cinética das partículas é reduzida, aumentando assim a rugosidade.

O estudo do efeito do aumento do caudal de abrasivos na rugosidade superficial revelou-se inconclusivo, uma vez que a rugosidade de superfície aumentou até um certo ponto e depois desse ponto diminuiu.

Para o avanço, concluiu-se que quanto maior o avanço maior será a rugosidade da superfície. Isto acontece pois quanto maior for o avanço, menor será o número de partículas abrasivas em contacto com o material.

Por fim, foi estudado o efeito do ângulo de ataque (ângulo entre o plano onde é executado o corte e a direcção do jacto). Os resultados mostraram-se, à semelhança do caudal de abrasivos, inconclusivos. A única conclusão experimental retirada foi o ângulo de ataque para o qual a rugosidade superficial é menor, esse ângulo foi de 22.5°.

A Tabela 2.2.2 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 2.2.2: Influência dos parâmetros de processo na rugosidade de superfície [Azmir e Ahsan].

	Avanço	Caudal de Abrasivos	Distância de <i>stand-off</i>	Pressão do Jacto de Água	Dureza dos Abrasivos	Ângulo de Ataque
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Rugosidade de Superfície	↑	↑↓	↑	↓	↓	↑↓
	↑ - Aumenta	↓ - Diminui		↑↓ - Inconclusivo		

2.5.3 Taxa de Remoção de Material

Babu e Jegaraj [21] estudaram a influência do diâmetro do jacto de água nos diferentes parâmetros alvo. No que à taxa de remoção de material diz respeito, concluiu-se que quanto maior for o diâmetro do jacto de água menor será a taxa de remoção de material.

Khanna *et al.* [22] realizaram um estudo sobre a influência dos parâmetros de processo na taxa de remoção de material de mármore no corte por jacto de água. Concluíram que os parâmetros mais importantes para uma maior taxa de remoção de material são o aumento da pressão do jacto de água e o aumento do caudal de abrasivos. No entanto, a distância de *stand-off* é um parâmetro sem grande influência na taxa de remoção de material.

Ebeid *et al.* [18] concluíram que a taxa de remoção de material diminui com um aumento do avanço.

A Tabela 2.2.3 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 2.2.3: Influência dos parâmetros de processo na taxa de remoção de material [Babu e Jegaraj, Khanna *et al.* e Ebeid *et al.*].

	Avanço	Caudal de Abrasivos	Distância de <i>stand-off</i>	Pressão do Jacto de Água	Diâmetro do Jacto de Água
	↑	↑	↑	↑	↑
Taxa de Remoção de Material	↓	↑	↑↓	↑	↓
	↑ - Aumenta	↓ - Diminui	↑↓ - Inconclusivo		

2.5.4 Geometria de *Kerf*

Quando um material é cortado, é formado o chamado *kerf* (Fig. 2.12) que não é mais do que o ângulo entre as duas superfícies resultantes do corte. Este ângulo ocorre pois é praticamente impossível conseguir duas superfícies paralelas após um corte. De referir ainda que a largura superior de *kerf* é, normalmente, maior do que a largura inferior.

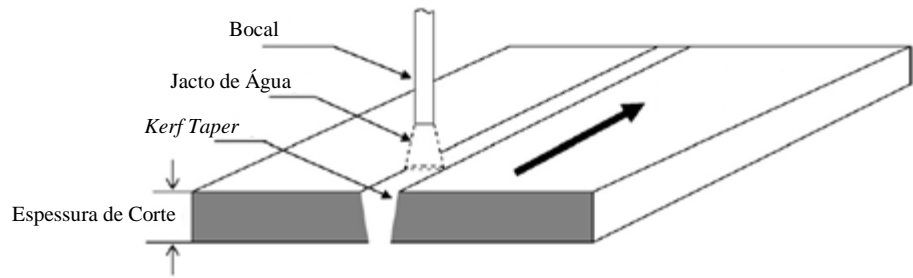


Fig. 2.12: *Kerf* resultante do corte um material por jacto de água (adaptado de [23]).

O estudo de Azmir e Ahsan [20] anteriormente referido, também incidiu no estudo da influência dos parâmetros de processo no *kerf*. Para abrasivos de maior dureza o *kerf taper* é menor, isto deve-se ao aumento da energia cinética das partículas que aumentam a *capability* de penetração no material, fazendo assim com que a largura superior de *kerf* seja relativamente grande mas a largura inferior também, originando assim um ângulo pequeno.

Um aumento da pressão do jacto de água leva, também, a um aumento da energia cinética. Assim, e pela mesma razão explicada anteriormente, o *kerf* diminuirá com o aumento da pressão.

Já um aumento da distância de *stand-off* leva a um aumento do *kerf*. Isto acontece pois quanto maior for a distância de *stand-off* mais o jacto expandirá e consequentemente maior será a largura superior de *kerf*. Esta expansão de jacto está também associada a uma redução na capacidade de penetração das partículas abrasivas no material, fazendo assim com que a largura inferior de *kerf* seja mais pequena. Assim, uma largura superior de *kerf* maior e uma largura inferior menor leva a um aumento do ângulo.

Para um aumento de caudal de abrasivos verifica-se um aumento da capacidade de penetração, assim, diminuindo assim o *kerf*.

No que ao avanço diz respeito, e à semelhança do ocorrido para a rugosidade de superfície, um aumento de avanço leva a uma redução do número de partículas abrasivas que atingem o material. Sendo o número de partículas a atingir a parte inferior de *kerf* menor do que as que atingem a parte superior, isto leva a que a diferença de larguras superior e inferior de *kerf* seja

tão maior quanto maior for o avanço. Assim sendo, o aumento do avanço leva a um aumento de *kerf*.

Por fim, foi ainda estudado, por Azmir e Ahsan, o efeito do ângulo de ataque. Porém os resultados não foram conclusivos quanto à sua influência no *kerf*.

A Tabela 2.2.4 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 2.2.4: Influência dos parâmetros de processo no *Kerf* [Azmir e Ahsan]

	Avanço	Caudal de Abrasivos	Distância de <i>stand-off</i>	Pressão do Jacto de Água	Dureza dos Abrasivos	Ângulo de Ataque
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<i>Kerf</i>	↑	↓	↑	↓	↓	↑↓
	↑ - Aumenta	↓ - Diminui		↑↓ - Inconclusivo		

2.5.5 Desgaste do Bocal

A eficiência do processo de corte por jacto de água está dependente da qualidade do bocal, assim é necessário conhecer os parâmetros que afectam o desgaste do bocal de forma a conseguir evitar ao máximo esse desgaste. Os parâmetros de processo que afectam o desgaste do bocal são o caudal de abrasivos e a pressão do jacto de água. Outros parâmetros como o comprimento ou o diâmetro do bocal também têm influência no desgaste do mesmo, porém não serão abordados neste trabalho.

Verma *et al.* [24] estudaram o efeito desses parâmetros de processo no desgaste do bocal de uma máquina de corte por jacto de água. Do seu estudo concluíram que o desgaste do bocal aumenta com o aumento do caudal de abrasivos bem como com o aumento da pressão do jacto de água.

2.6 Vantagens e Desvantagens

Esta tecnologia de corte apresenta vantagens e desvantagens em relação às demais.

- Vantagens [3][7][25]
 - Processo relativamente rápido;
 - Não produz gases tóxicos ou poeiras;
 - Não forma zonas termicamente afectadas no material a maquinar;
 - Capacidade de corte em várias direcções;
 - Não necessita de preparação superficial;
 - Consegue cortar materiais desde 1.6mm até 300mm de espessura;
 - Excelente precisão, é capaz de cumprir tolerâncias de $\pm 0.05\text{mm}$;

- As peças a cortar podem estar muito próximas umas das outras, maximizando a utilização do material;
- Processo facilmente automatizável.
- Desvantagens [3] [25]
 - Elevada manutenção;
 - Custo de maquinaria horário elevado;
 - Formação de *kerf*;
 - Peças afectadas pela deflexão do jacto de água (Fig. 2.13 (a));
 - Atraso entre o ponto de entrada e saída do jacto na peça, pode levar a defeitos nas peças aquando de mudanças de direcção (Fig. 2.13 (b)).

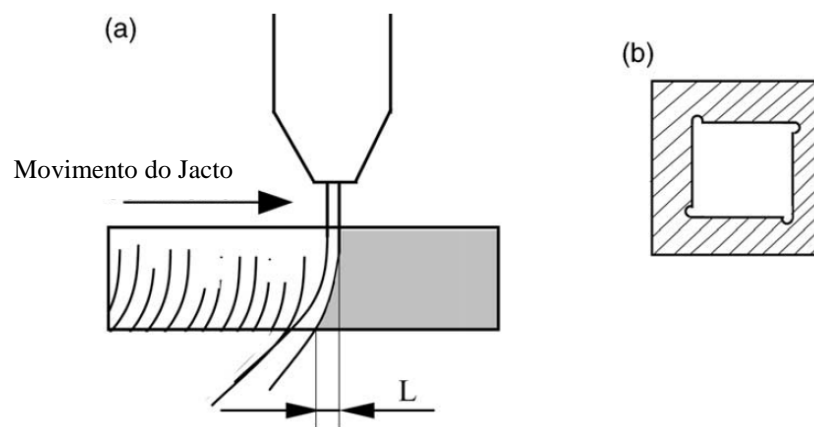


Fig. 2.13: (a) Deflexão do jacto de água. (b) Defeito no canto de uma peça causado pelo atraso do jacto de água. (adaptado de [25])

2.7 Custos horários de funcionamento

A estimativa do custo de funcionamento por hora da máquina, é fundamental para determinar quanto vai custar a fabricação de uma peça. Os principais custos estão associados a:

- Operador: Normalmente o valor utilizado é cerca de 1.3 vezes o salário do operador da máquina;
- Abrasivos: O custo dos abrasivos está directamente relacionado com a quantidade dos mesmos utilizados (em média, são utilizados cerca de 0.5kg de abrasivo por minuto). O cálculo do custo é depois efectuado tendo em conta o preço por kg de abrasivo que pode variar entre 0.30€/kg e 0.80€/kg;
- Máquina: Referente aos valores a pagar mensalmente para a amortização do custo da máquina;
- Electricidade e água;

- Componentes: Custos referentes a todos os componentes, danificados durante a maquinação, que têm de ser substituídos. Sejam eles o tubo de mistura, *nozzle* ou componentes da tubagem de alta pressão, por exemplo [26].

2.8 Análise Sintética

O corte por jacto de água é um processo de maquinação que permite obter peças de geometria complexa com elevada precisão, que em certas circunstâncias constitui a melhor alternativa. Como foi visto anteriormente, o seu desempenho está directamente relacionado com os parâmetros de processo em uso. Porém, na maioria dos casos, as empresas após adquirirem uma máquina de corte por jacto de água não sabem se os parâmetros de origem são os melhores para as suas necessidades. Assim, abre-se uma janela de oportunidade para a melhoria e optimização desses mesmos parâmetros, e será esse o tema desta dissertação.

3. Metodologias de Trabalho

3.1 Sequência dos Trabalhos

De forma a melhor estruturar esta dissertação, foi definida uma sequência de trabalhos. Essa sequência de trabalhos foi realizada com a ordem seguinte.

1. Tomada de conhecimento do equipamento e do seu funcionamento.
2. Perceber o que pode ser entendido como resultado/desempenho do equipamento.
3. Perceber o conjunto de factores/variáveis que influenciam o desempenho do equipamento.
4. Análise dos parâmetros que podem ser tratados como constantes ou como variáveis do projecto.
5. Conhecer os limites de funcionamento de cada variável.
6. Perceber a influência das variáveis no desempenho do equipamento.
7. Realização de simulação com vista a encontrar zonas de trabalho que à partida conduzem a bons resultados.
8. Análise de benefícios dessas zonas de trabalho.
9. Realização de experiências que permitam aceitar (ou não) os resultados da simulação, e validar dados do estado da arte.
10. Criar métodos de predição de resultados.
11. Definição de condições de funcionamento do equipamento, que conduzem à optimização da sua utilização.

3.2 Planeamento de Experiências

O planeamento de experiências (Design of Experiments – DoE) [27], é um teste ou um conjunto de testes nos quais são feitas alterações propositadas às variáveis de processo para que seja possível observar e identificar, razões para as alterações nas respostas.

O processo alvo de estudo pode ser representado pela Fig. 3.1.

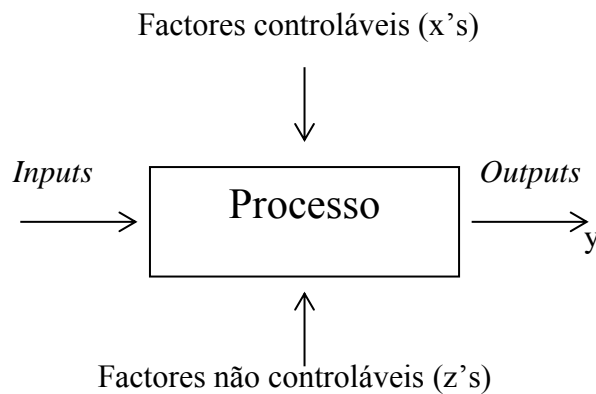


Fig. 3.1: Representação de um processo (adaptado de [27]).

Os objectivos de um DoE podem incluir:

- Determinar quais as variáveis que são mais influentes na resposta, y .
- Determinar quais os valores dos x 's mais influentes, para que a resposta y seja quase sempre o mais próxima possível do valor nominal desejado.
- Determinar quais os valores dos x 's mais influentes, para que a variabilidade da resposta y seja pequena.
- Determinar quais os valores dos x 's mais influentes, para que os efeitos nas variáveis não controláveis z 's sejam mínimos.

O planeamento de experiências é uma ferramenta muito importante no mundo da engenharia, para melhorar o desempenho de um processo de fabrico. A aplicação de tal DoE pode resultar, no aumento do rendimento, na redução de tempo ou na redução de custos do processo.

A realização de um bom DoE deve seguir a seguinte directriz:

- Identificação do problema.
- Escolha dos factores e respectivos níveis.
- Escolha da resposta alvo de estudo.
- Escolha do tipo de DoE a ser realizado.
- Realização das experiências.
- Análise dos dados.
- Conclusões e recomendações[27].

3.3 Metodologia de Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (Response Surface Methodology – RSM) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas, úteis para a modelação e análise de problemas

cuja resposta de interesse é afectada por várias variáveis e cujo objectivo é otimizar essa resposta [27].

Os métodos de resposta de superfície são técnicas utilizadas antes, durante e após a realização de uma análise de regressão aos dados. Antes da aplicação de uma RSM, é necessário a realização de um DoE por forma a determinar quais as variáveis e quais os seus níveis que devem ser utilizados durante as experiências.

O valor da resposta η , depende dos níveis X_1, X_2, \dots, X_k de k factores quantitativos $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$. Assim, existe uma função matemática que relaciona a resposta com os diferentes níveis de factores, dada por:

$$\eta = \Phi(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

A função Φ é chamada função de resposta e é assumida como sendo uma função contínua de X_i . Para representar a relação entre os factores e a resposta, um modelo matemático chamado “modelo polinomial” pode ser utilizado. Através da aplicação das séries de Taylor é possível obter uma expansão que pode ser reduzida à seguinte forma polinomial:

$$\eta = \Phi(X_1, X_2, \dots, X_k) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \dots + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde os coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \dots$ são os chamados coeficientes de regressão.

Uma técnica utilizada para ajudar a visualizar a forma desta resposta de superfície tridimensional é a realização de gráficos de contorno da superfície de resposta. Num gráfico de contorno, linhas ou curvas de igual valor de resposta são desenhadas num plano cujas coordenadas representam os níveis dos diferentes factores [28].

3.4 Planeamento de experiência de Box Behnken

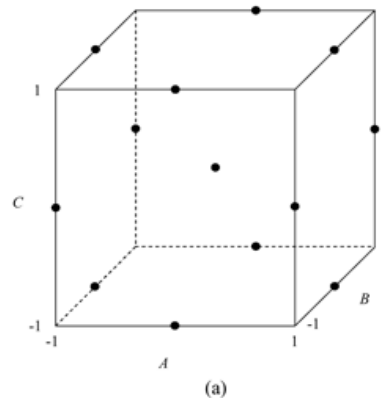
Box e Behnken (1960) sugeriram como seleccionar uma fracção de um arranjo factorial de 3^k que permita uma estimativa eficiente para determinar os coeficientes de regressão. Os níveis de cada factor k , são assumidos como igualmente espaçados pelo que os valores codificados de x_i são -1, 0 e 1 [28].

É importante então conseguir estabelecer uma relação entre valores codificados e valores não codificados. Para tal é utilizada a seguinte equação:

$$X_{\text{não codificado}} = \frac{\text{Máx.} + \text{Min.}}{2} + X_{\text{codificado}} \times \frac{\text{Máx.} - \text{Min.}}{2} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde “máx.” e “min.” dizem respeito aos valores máximos e mínimos de cada factor, em unidades não codificadas.

Nesta dissertação foi aplicado um modelo de Box-Behnken para 3 factores (num total de $3^3=27$ experiências). Porém, a grande vantagem deste método é a não necessidade de realizar o total das experiências, pelo que apenas uma parte das mesmas foi realizado. Assim, este conjunto de experiências pode ser representado por um cubo (Fig. 3.2).



Run	Factors		
	A	B	C
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0

(b)

Fig. 3.2: Representação da metodologia Box-Behnken para 3 factores [29]

3.5 Análise da Variância

A análise da variância (Analysis of Variance - ANOVA) é uma técnica estatística que permite proceder à comparação entre parâmetros de duas ou mais populações. Esta análise possibilita a repartição da variabilidade total dos dados experimentais pelas diversas componentes causadoras da variabilidade, sendo assim possível determinar que componentes são estatisticamente significativos [30].

Assim, após a realização de um DoE, deve ser realizada uma análise de variância para o tratamento dos resultados obtidos. Sendo importante o valor de adequabilidade do modelo, R^2 (variável entre 0 e 1), sendo que quanto maior o seu valor melhor o modelo criado se aproxima aos dados.

4. Equipamento Utilizado

A máquina de corte por jacto de água que será alvo de estudo nesta dissertação, através das metodologias anteriormente referidas, é a *Maxiem 1530* da *OMAX Corporation*. No entanto, o equipamento utilizado é mais do que apenas a própria máquina. É necessário um sistema de filtragem de água, um sistema de arrefecimento de água, uma bomba hidráulica, um computador com os softwares necessários para comandar e controlar o corte e um tanque para armazenar os abrasivos, ao que se junta então a máquina de corte por jacto de água.

4.1 Sistema de Filtragem de Água

A qualidade da água é fundamental para uma máquina de corte por jacto de água. Uma água de má qualidade, rica em minerais, reduz a vida dos componentes da máquina de corte ou da bomba de água, sobretudo os componentes que estão sujeitos a elevadas pressões de água (como “O-Rings”, tubagem ou o nozzle por exemplo). É assim fundamental conseguir ter a água com a melhor qualidade possível, para isso é instalado um sistema de filtros (Fig. 4.1) para conseguir filtrar todas as impurezas indesejáveis.



Fig. 4.1: Sistema de filtragem de água.

Numa fase inicial, a água é forçada a passar por um filtro de 50µm (Fig. 4.1 a)). Em seguida passa por mais dois filtros, um de 1µm e outro de 0.2 µm (Fig. 4.1 b)). Por fim passa pelo último conjunto de 2 filtros, desta vez são filtros da marca da máquina (OMAX) de 1 e 3µm (Fig. 4.1c)).

Após passar por este conjunto de filtros, a água passa por um filtro de calcite (Fig. 4.1 d)), cujo principal objectivo é aumentar o pH da água. Por fim a água passa por um “filtro rocha” (Fig. 4.1 e)), onde a água passa por rochas de diferentes tamanhos (que são reduzidos gradualmente) que funciona como filtros naturais.

4.2 Sistema de Arrefecimento de Água

Após filtrada, a água necessita de ser arrefecida a uma temperatura entre 15 a 20 °C. Tal é necessário, já que quanto maior a temperatura, maior será o desgaste nas juntas da bomba de água. Assim, para conseguir manter a água na temperatura certa, esta passa por um “chiller” (Fig. 4.2) que a arrefece até atingir a temperatura desejada.



Fig. 4.2: Chiller para arrefecimento de água.

4.3 Bomba Hidráulica

Estando já filtrada e à temperatura correcta, a água chega à bomba hidráulica (Fig. 4.3). É uma bomba de accionamento directo, com 40CV de potência e um rendimento que ronda os 85%. A sua função é aumentar a pressão da água para valores entre 46000 e 50000 psi (317 a 344MPa, respectivamente).



Fig. 4.3: Bomba Hidráulica.

4.4 Máquina de Corte por Jacto de Água – MAXIEM 1530

Após pressurizada a água segue para a máquina de corte por jacto de água. A máquina que será alvo de otimização, como referida anteriormente, é o modelo *MAXIEM 1530* da *OMAX Corporation* (Fig. 4.4). É uma máquina de corte de 5 eixos com elevadas precisões (na casa das décimas de milímetro) e velocidade de corte. A mesa de corte tem de dimensões 3708 mm x 1740 mm, e tem movimento X-Y-Z de 3061 mm x 1575 mm x 305 mm.

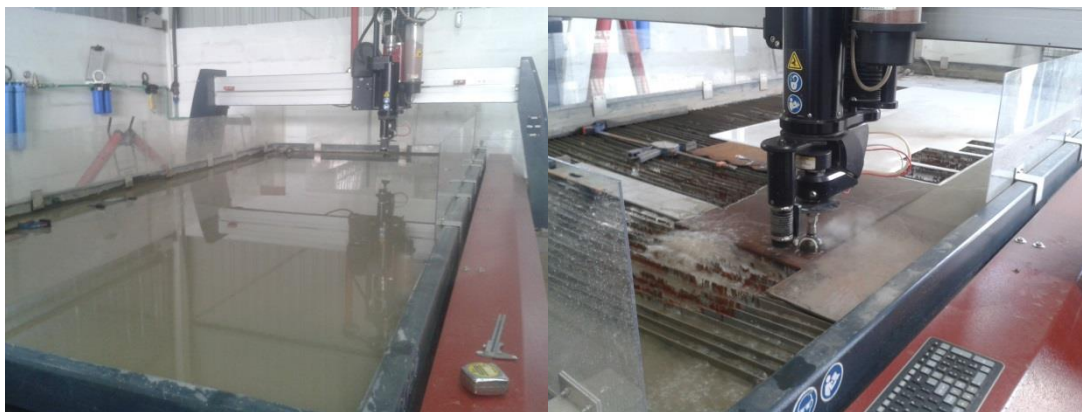


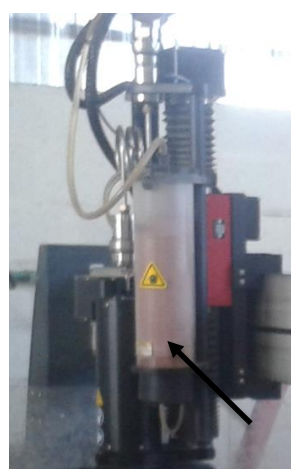
Fig. 4.4: Máquina de corte por jacto de água – MAXIEM 1530.

4.5 Tanque de Abrasivos

De referir ainda o local onde são armazenados os abrasivos, o tanque de abrasivos (Fig. 4.5 a)). Neste tanque os abrasivos são armazenados sob vácuo para evitar a contaminação dos mesmos. Este tanque tem uma válvula no seu fundo que regula a saída, de abrasivos. Conectada a essa válvula está uma mangueira que tem ligação ao *hopper* [assinalado na Fig. 4.5 b)] de abrasivos da máquina [Fig. 4.5 b)]. Conseguindo assim manter o nível de abrasivos no *hopper* constante de forma a evitar a falta de abrasivos durante o corte.



a)



b)

Fig. 4.5: a) Tanque de abrasivos; b) Ligação do tanque de abrasivos ao Hopper.

4.6 Softwares *OMAX Make* e *OMAX Layout*

Por fim, o componente chave, de comando e controlo de todo o sistema, um computador (Fig. 4.6) com os softwares *OMAX Make* e *OMAX Layout*.

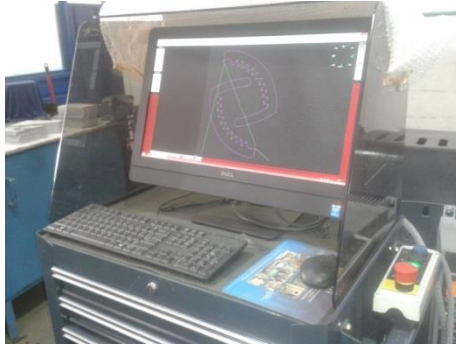


Fig. 4.6: Computador utilizado para controlar o funcionamento da máquina.

O primeiro software a ser utilizado é o *OMAX Layout* (Fig. 4.7). É neste software que se define qual a geometria a maquinar, é possível importar ficheiros de CAD de outros softwares para o *OMAX Layout* ou então a geometria pode ser feita no próprio software que tem um sistema próprio de CAD (utilizado apenas para peças de geometria mais simples). É também neste software que se define qual o caminho que a cabeça de corte irá percorrer durante o corte e qual a qualidade desejada da peça.

A qualidade é avaliada de 1 a 5. A qualidade 1, corte bruto, é utilizada para peças que necessitem de ser maquinadas posteriormente. É um corte mais rápido, mais barato, mas com mau acabamento superficial e má precisão geométrica (chega a haver inexactidões de um ou mais milímetros). O outro extremo é a qualidade 5, corte de qualidade muito alta, é um corte extremamente preciso (abaixo um décimo de milímetro) e que não necessita de maquinação posterior. Porém, é um corte extremamente demorado e caro. A qualidade mais utilizada acaba por ser a qualidade 3, corte padrão, que consegue a melhor relação entre acabamento e tempo/preço.

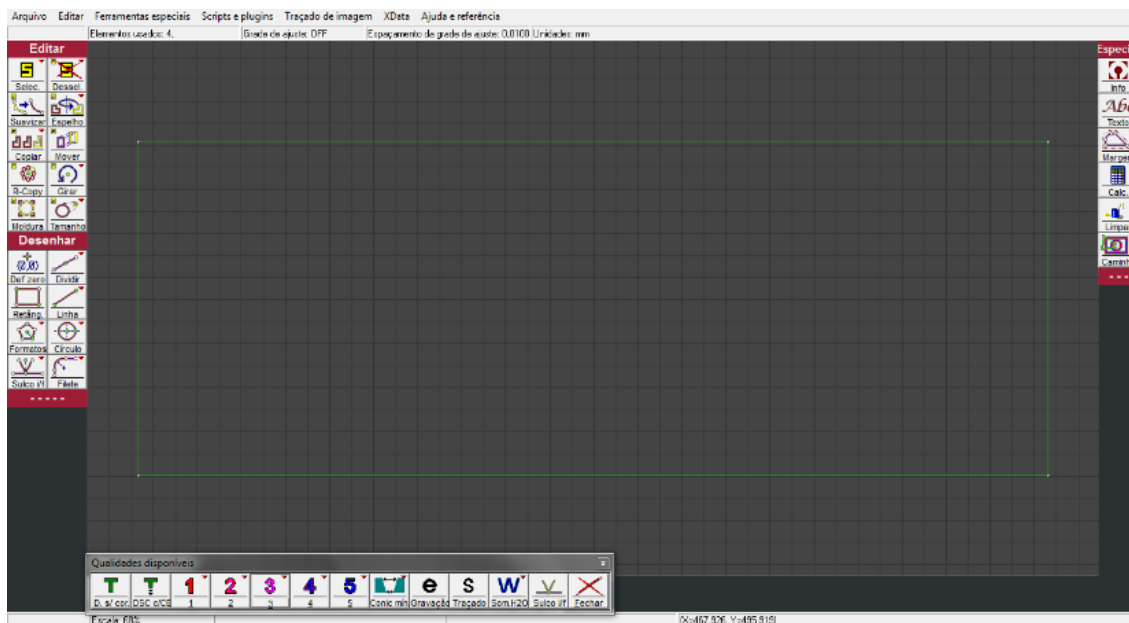


Fig. 4.7: Software OMAX Layout.

Definida a geometria e a qualidade de corte, o modelo CAD obtido no *OMAX Layout* é aberto no outro software, o *OMAX Make* (Fig. 4.8). É neste *software* que se definem todos os parâmetros associados ao corte. Começando pelo material e a respectiva espessura, e depois definindo a pressão de água, fluxo de abrasivos e distância de *stand-off* (fixada sempre a 2mm por recomendação do fabricante). É também com este *software* que se controla o comportamento da máquina, já que é ele que controla o início e fim de corte, bem como é responsável pelo ajuste da posição da cabeça de corte.

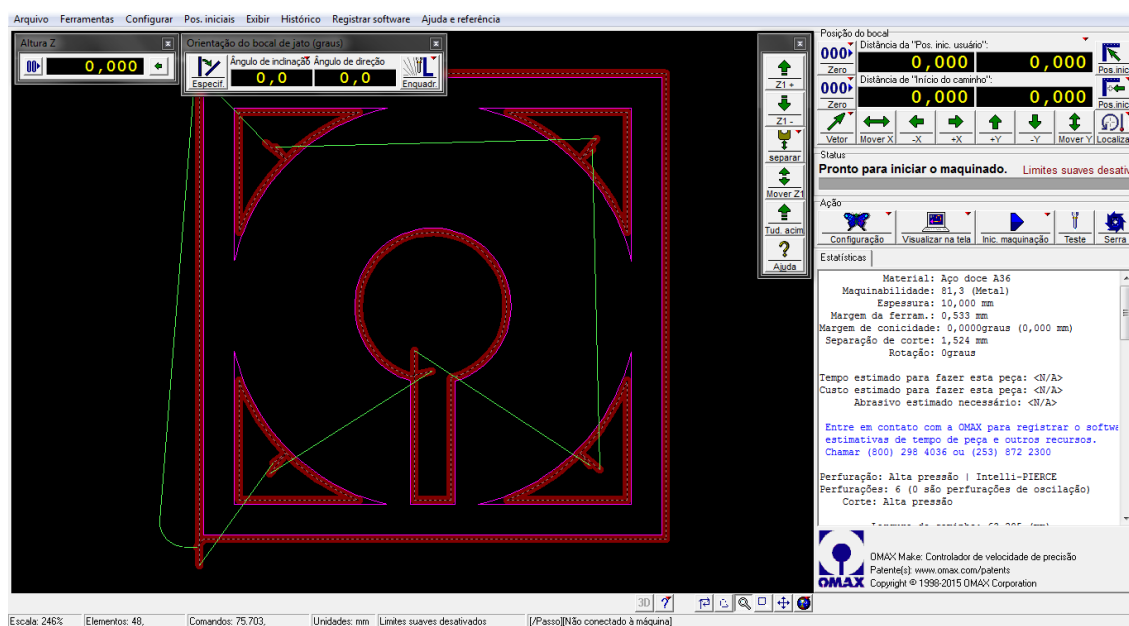


Fig. 4.8: Software OMAX Make.

O software OMAX Make fornece também as informações referentes à quantidade de abrasivos utilizados durante a maquinação, tempo de maquinagem e custo da mesma (Fig. 4.9).

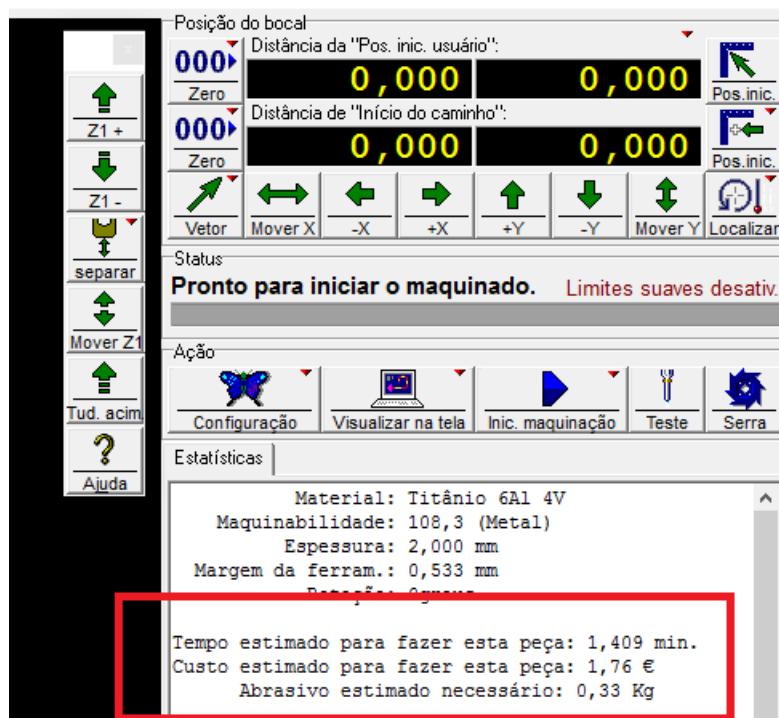


Fig. 4.9: Respostas obtidas com o software OMAX Make.

5. Procedimento Experimental

5.1 Experiências simuladas

As experiências simuladas dizem respeito à aplicação de um DoE com recurso a simulações utilizando apenas os softwares da máquina, sem recurso à maquinação de peças. A principal vantagem desta solução é a não existência de custos associados, permitindo assim que o número de experiências realizado seja o desejado uma vez que não estamos restringidos pelo custo. Algo que aconteceria se se tivesse de maquinar todas as peças necessárias para este DoE onde se teriam de abdicar de algumas combinações de parâmetros (para maquinar menos peças), reduzindo assim a precisão do DoE.

5.1.1 Definição dos Parâmetros e Respostas a Estudar

Como foi referido anteriormente, o primeiro passo na realização de um DoE é definir qual a resposta que se pretende estudar. Nesta dissertação serão três as respostas alvo de estudo: tempo de maquinagem, quantidade de abrasivos utilizados e custo. Sendo o objectivo minimizar essas mesmas respostas.

Em seguida é necessário definir quais os parâmetros que influenciam essas mesmas respostas. Os parâmetros escolhidos foram a pressão de água, o fluxo de abrasivos e a espessura do material. Foram considerados apenas estes três parâmetros por serem aqueles que nos é possível alterar, já que a distância de *stand-off* está fixa por recomendação do fabricante e parâmetros como o avanço são obtidos automaticamente, e variam consoante os valores de fluxo de abrasivos e pressão introduzidos no software *OMAX Make*.

Definidos os parâmetros, é necessário definir qual o “range” dos mesmos antes de realizar o DoE. Para a espessura foi considerado o “range” mais usual de ser maquinado na empresa. A espessura mínima normalmente maquinada no jacto de água são 5mm, já a máxima são 20mm. A pressão de água varia entre 46000PSI e 50000PSI e pode ser ajustada manualmente na bomba hidráulica, tal como referido anteriormente.

Por fim, é necessário definir qual o range do fluxo de abrasivos. O fluxo de abrasivo é definido pelo orifício utilizado. Existe um conjunto de orifícios diferentes (Fig. 5.1a), que regulam qual o fluxo de abrasivos utilizado. Para alterar o fluxo de abrasivos basta trocar o orifício em uso no *hopper* (Fig. 5.1b)), por um diferente.



Fig. 5.1: a) Orifícios disponíveis para ajuste do fluxo de abrasivos.
b) Encaixe dos orifícios no *hopper*.

Sabendo como ajustar o fluxo de abrasivos, é agora necessário conhecer qual o fluxo de abrasivos correspondente a cada orifício. Para tal é efectuado um teste onde a máquina utiliza apenas abrasivos, durante um minuto (Fig. 5.2). É depois pesada a quantidade de abrasivos utilizada durante esse minuto e obtido o valor de fluxo de abrasivos associado a cada orifício (em kg/min).



Fig. 5.2: Determinação do fluxo de abrasivos associado a cada orifício.

A Tabela 5.1 sintetiza os valores de fluxo de abrasivos associados a cada orifício.

Tabela 5.1: Fluxo de abrasivos associado a cada orifício.

Nº do Orifício	Fluxo de Abrasivos (kg/min)
10	0.180
12	0.310
14	0.470
16	0.670
18	0.925*
20	*

*O fluxo de abrasivos utilizado por estes orifícios entope o vazo, pelo que para poderem ser utilizados estes orifícios é necessário a substituição do vazo por um maior.

Definidos os parâmetros é agora necessário definir os níveis mínimos e máximos que serão utilizados no DoE. A Tabela 5.2 sintetiza os valores máximos e mínimos dos parâmetros, bem como os valores utilizados actualmente.

Tabela 5.2: Níveis máximo, mínimo e em uso dos parâmetros fluxo de abrasivos, pressão de água e espessura.

	Mínimo	Máximo	Em uso
Fluxo de Abrasivos (kg/min)	0.180	0.670	0.470
Pressão de Água (PSI)	46000	50000	48000
Espessura (mm)	5	20	-

5.1.2 Realização do DoE

Existem agora condições de realizar o DoE o que permitirá obter quais os níveis de cada parâmetro que devem ser utilizados para conseguir minimizar as respostas, tal como é objectivo nesta dissertação. O planeamento de experiências (DoE) utilizado será o Box-Behnken e cada um dos três parâmetros em estudo terá três níveis: -1, 0 e 1 (Tabela 5.3).

De referir ainda que o menor valor de fluxo de abrasivos foi definido como 0.31 kg/min em vez de 0.18 kg/min. Isto porque um fluxo de abrasivos muito baixo (como é o caso de 0.18 kg/min) é apenas utilizado para maquinar materiais mais macios que os materiais alvo de estudo nesta dissertação.

Tabela 5.3: Níveis -1, 0 e 1 utilizados na metodologia de Box-Behnken

	-1	0	1
Fluxo de Abrasivos (kg/min)	0.310	0.470	0.670
Pressão de Água (PSI)	46000	48000	50000
Espessura (mm)	5	12.5	20

Como referido anteriormente, o software OMAX Make permite obter as respostas alvo de estudo nesta optimização. Assim, este DoE será realizado apenas simulando as experiências no software.

Falta apenas definir qual o material e a geometria a utilizar neste DoE. Os materiais mais utilizados pela empresa são Aço St-37 e St-52, Hardox 450, Inox, Alumínio e Cobre. Assim, foi escolhido o Alumínio para realizar este DoE, sendo a geometria um rectângulo 100x50mm e a qualidade escolhida foi a qualidade padrão Q3. A Tabela 5.4 sintetiza os resultados obtidos neste DoE.

De referir ainda que o software utilizado para realizar este DoE foi o *MiniTab*.

Tabela 5.4: Síntese das experiências simuladas com o material Alumínio.

Material: Alumínio 2024 (Índice de Maquinabilidade:215)					Tempo (min)			Qtd.Abrasivos (kg)			Custo (€)		
					Espessura			Espessura			Espessura		
Ensaio	Pressão (PSI)	Fluxo Abrasivos (kg/min)	x_P	x_{FA}	5mm	12.5mm	20mm	5mm	12.5mm	20mm	5mm	12.5mm	20mm
1	50000	0.67	+1	+1	0.475	1.074	1.822	0.24	0.65	1.15	0.59	1.34	2.28
2	46000	0.67	-1	+1	0.524	1.210	2.122	0.28	0.74	1.35	0.66	1.51	2.65
3	46000	0.31	-1	-1	0.609	1.548	2.753	0.15	0.45	0.82	0.76	1.93	3.44
4	50000	0.31	+1	-1	0.549	1.370	2.417	0.14	0.39	0.72	0.69	1.71	3.02
5	48000	0.67	0	+1	0.498	1.138	1.938	0.26	0.69	1.23	0.62	1.42	2.42
6	48000	0.31	0	-1	0.573	1.428	2.579	0.14	0.41	0.77	0.72	1.79	3.22
7	46000	0.47	-1	0	0.562	1.373	2.430	0.21	0.59	1.09	0.70	1.72	3.04
8	50000	0.47	+1	0	0.508	1.174	2.128	0.19	0.50	0.95	0.63	1.47	2.66
9	48000	0.47	0	0	0.533	1.245	2.266	0.20	0.53	1.02	0.67	1.56	2.83

5.1.2.1 Tempo de Maquinagem

A primeira resposta a ser estudada foi o tempo de maquinagem, com o principal objectivo de minimizá-lo. A Fig. 5.3 b) permite analisar que influência a relação entre a pressão e a espessura de material têm no tempo de maquinagem. É assim possível concluir que para valores baixos de espessura, o tempo de maquinagem é praticamente o mesmo para os vários valores de pressão. Porém, à medida que a espessura vai aumentando a pressão vai tendo um papel cada vez mais preponderante na variação do tempo. No entanto, e para qualquer que seja a espessura, o menor valor de tempo é sempre alcançado utilizando o maior valor de pressão. Confirmando assim que os menores valores de tempo são alcançados com pressões mais elevadas e que quanto maior for a espessura maiores são as reduções de tempo, quando utilizados maiores valores de pressão.

Na Fig. 5.3 a) vemos que os menores valores de tempo são sempre alcançados utilizando os maiores valores quer de pressão quer de fluxo de abrasivos. É também possível concluir que para qualquer valor de fluxo de abrasivos, o menor tempo de maquinagem será sempre obtido utilizando o maior valor de pressão.

Já na Fig. 5.3 c), conclui-se que para baixas espessuras o valor de fluxo de abrasivos não é muito relevante. Porém, para maiores espessuras quanto maior for o fluxo de abrasivos utilizado menor será o tempo de maquinagem e tal é mais acentuado quanto maior for o valor da espessura.

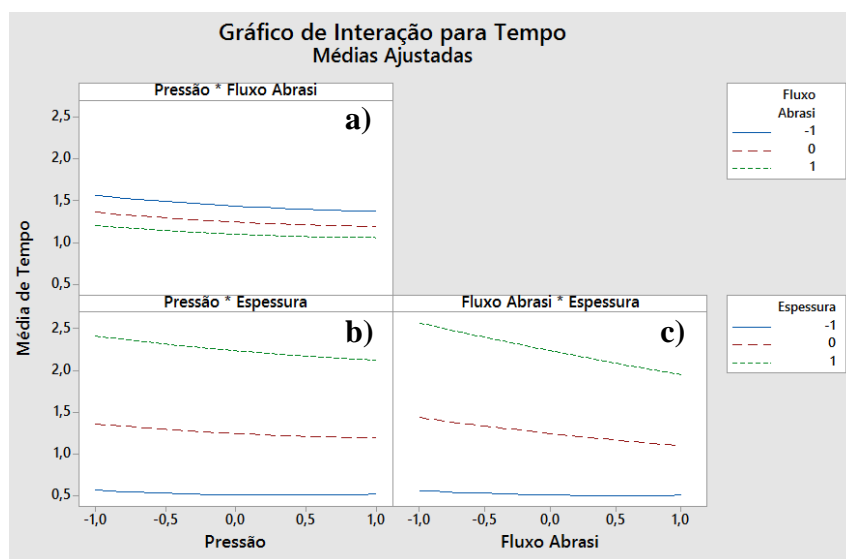


Fig. 5.3: Gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros para a resposta Tempo.

Da Fig. 5.4 é possível confirmar que o factor mais influente para o tempo de maquinagem é a espessura, sendo maior o tempo quanto maior for a espessura, como era espectável. No entanto, é possível também confirmar o que foi dito anteriormente, são obtidos menores valores de tempo quando utilizados maiores valores de pressão e o mesmo se verifica quando utilizados

maiores valores de fluxo de abrasivos. Sendo, porém, o fluxo de abrasivos o parâmetro mais influente dos dois no que à redução de tempo diz respeito.

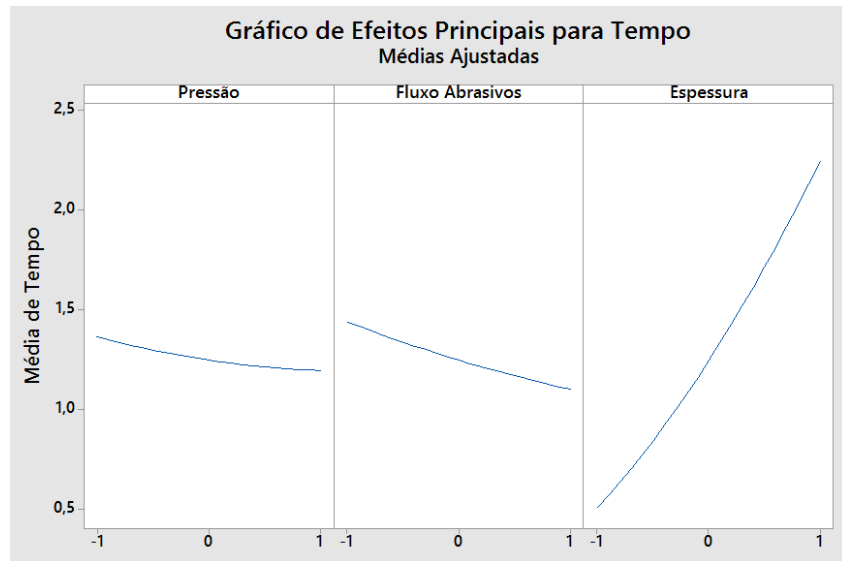


Fig. 5.4: Gráficos de efeitos principais para a resposta Tempo.

As Fig. 5.5 b) e c) ajudam a visualizar o que foi dito anteriormente, e confirmam que os menores valores de tempo são alcançados para os maiores valores de pressão e fluxo de abrasivos. Porém, a Fig. 5.5 a) difere da realidade já que, por exemplo, o valor de tempo para Pressão 0 e Fluxo de Abrasivos 0 é inferior ao valor obtido com Pressão +1 e Fluxo de Abrasivos +1. Algo que não acontece quando se simulam as experiências na máquina, já que para a espessura de 5mm quando utilizados pressão e fluxo de abrasivos ambos a nível 0 (Pressão 0 + Fluxo de Abrasivos 0) o valor de 0.533min é superior ao valor de 0.475min obtido quando utilizados pressão e fluxo de abrasivos ambos a nível 1. Esta diferença no aspecto da Fig. 5.5 a) quando comparado com as Fig. 5.5 b) e c) pode ser explicado já que aquando da realização da superfície de resposta, a quantidade de dados para espessura de 5mm é inferior à quantidade de dados utilizados para valores superiores de espessura (algo que não pode ser controlado pelo utilizador, uma vez que é o software *MiniTab* que “diz” quais os dados que devemos ser introduzidos para a realização desta resposta de superfície).

Pode-se assim concluir que o comportamento da máquina é o mesmo para qualquer espessura (já que a Fig. 5.5 a) se devia assemelhar às Fig. 5.5 b) e c)), e que o menor valor de tempo de maquinagem é sempre obtido utilizando os níveis máximos quer de pressão quer de fluxo de abrasivos, ou seja, pressão +1 e fluxo de abrasivos +1.

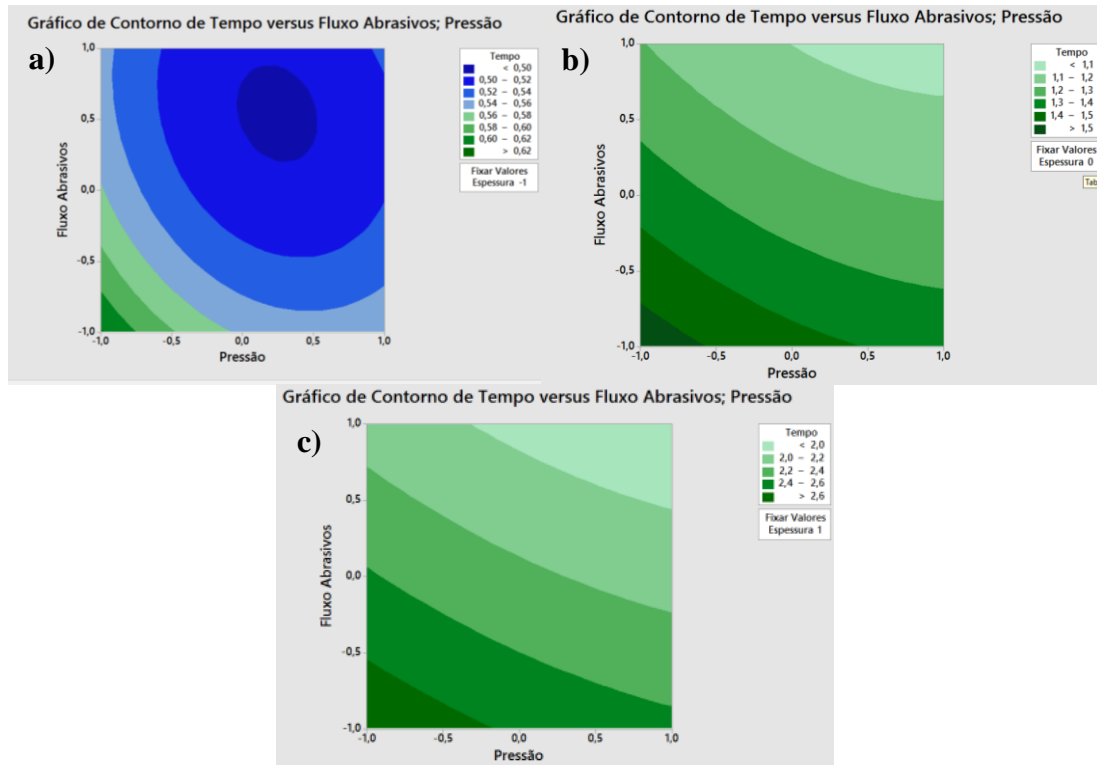


Fig. 5.5: Gráficos de contorno para a resposta Tempo em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12.5mm e c) 20mm.

Por fim, foi ainda obtida uma equação que dá o tempo de maquinagem, em unidades não codificadas, em função dos diferentes parâmetros: pressão (x_P), fluxo de abrasivos (x_{FA}) e espessura (x_E), em unidades codificadas. De referir que esta é a equação referente aos parâmetros principais para uma distribuição de *t-student* bicaudal, com um nível de confiança de 98% (valor de $T > 4.541$, para três variáveis).

$$\begin{aligned} \text{Tempo} = & 1,24500 - 0,08375 x_P - 0,16875 x_{FA} + 0,86675 x_E \\ & + 0,12925 x_E * x_E - 0,06200 x_P * x_E - 0,14150 x_{FA} * x_E \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Por forma a avaliar o quão próxima da realidade é esta aproximação obtida com a equação, foram comparados valores obtidos com a equação com os valores obtidos nas experiências simuladas na máquina de corte por jacto de água. Esses resultados encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores de tempo obtidos utilizando a equação em comparação com os valores obtidos na máquina de corte por jacto de água.

Pressão	Fluxo de Abrasivos	Espessura	Tempo (min)		
			Equação	Real	Variação
-1	-1	-1	0.623	0.609	+2.21%
0	0	-1	0.508	0.533	-4.78%
+1	+1	-1	0.525	0.475	+10.42%
-1	-1	+1	2.763	2.753	+0.36%
0	0	+1	2.241	2.266	-1.10%
+1	+1	+1	1.851	1.822	+1.59%

Podemos assim concluir que a equação obtida é uma excelente aproximação da realidade para valores que não sejam de espessuras baixas. O valor de $R^2=99.68$, obtido através da análise da variância (ANOVA), confirma a excelente aproximação entre este modelo e a realidade. De referir que a ANOVA referente a esta e às restantes respostas se encontra nos Anexos (Anexo 1 a Anexo 3) desta dissertação.

5.1.2.2 Quantidade de Abrasivos Utilizados

A segunda resposta alvo de estudo nesta optimização foi a quantidade de abrasivos utilizada, e mais uma vez o objectivo é minimizar essa resposta. Começando pela influência que a relação entre os diferentes parâmetros têm na quantidade de abrasivos utilizados, na Fig. 5.6 c) pode-se ver a interacção entre o fluxo de abrasivos e a espessura. Como é possível confirmar, a menor quantidade de abrasivos utilizada é sempre obtida quando utilizado um menor fluxo de abrasivos, algo que é válido para qualquer espessura de material a maquinar. E, tal como seria de esperar, quanto menor for a espessura menor será a quantidade de abrasivos utilizada, algo previsível, já que o volume de material removido durante o corte é menor e como tal é necessária uma menor quantidade de abrasivos.

Já da análise da Fig. 5.6 b), é possível afirmar que o menor valor de quantidade de abrasivos é sempre obtido com o máximo valor de pressão, e que é algo que se verifica para qualquer que seja a espessura. Sendo a redução de quantidade de abrasivos, para maiores valores de pressão, mais acentuada para maiores espessuras.

Por fim, a Fig. 5.6 c) permite concluir que para qualquer que seja o fluxo de abrasivos utilizado, a menor quantidade de abrasivos é sempre obtida quando utilizado o maior valor de pressão. Mais, é também possível concluir que o menor valor de quantidade de abrasivos é sempre alcançado utilizando o maior valor de pressão e o menor valor de fluxo de abrasivos.

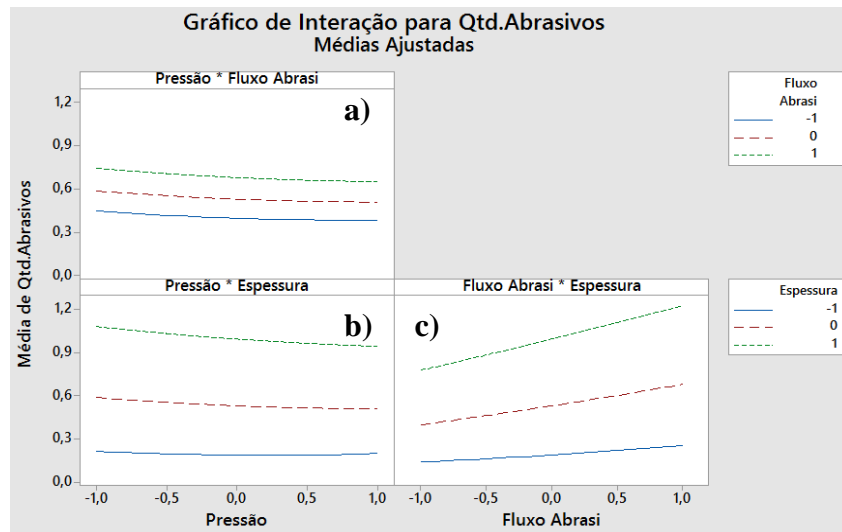


Fig. 5.6: Gráficos de interação entre os diferentes parâmetros para a resposta Quantidade de Abrasivos.

A Fig. 5.7 confirma o que seria de esperar, o parâmetro mais influente na quantidade de abrasivos é a espessura. Já que, tal como referido anteriormente, quanto maior a espessura maior será o volume de material a remover durante o corte e como tal maior será a quantidade de abrasivos necessária. No que à pressão diz respeito, conclui-se que para reduzir a quantidade de abrasivos utilizada é necessário utilizar o maior valor de pressão. Já o fluxo de abrasivos têm um comportamento contrário à pressão, uma vez que quanto menor for o fluxo de abrasivos, menor será a quantidade de abrasivos.

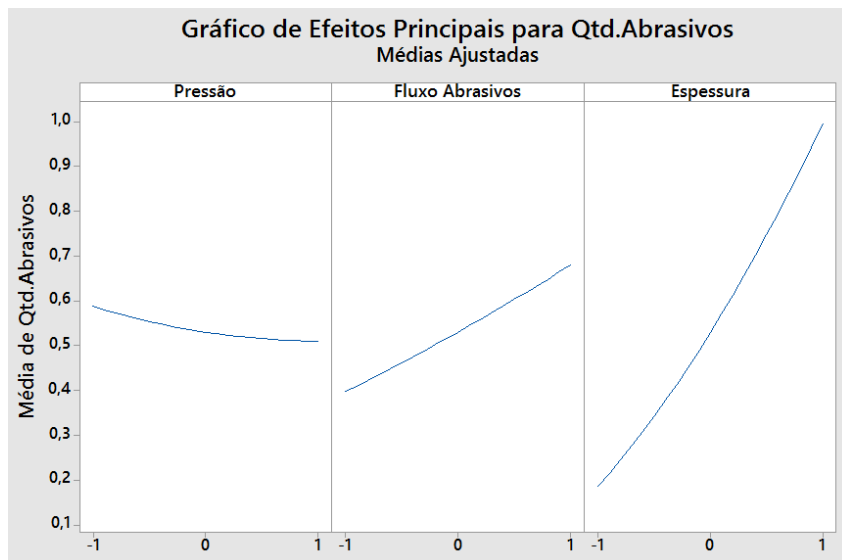


Fig. 5.7: Gráficos de efeitos principais para a resposta Quantidade de Abrasivos.

Por fim, as Fig. 5.8b) e c) ajudam a visualizar o que foi concluído anteriormente, que para minimizar a quantidade de abrasivos utilizada é necessário utilizar o maior valor de pressão e o menor valor de fluxo de abrasivos. Porém, e tal como aconteceu para a resposta Tempo, a Fig. 5.8 a) não se assemelha à realidade, pelas mesmas razões justificadas na análise feita para a Fig. 5.5 a). Assim, pode-se mais uma vez concluir que a máquina se comporta da mesma forma para qualquer que seja a espessura, e que a otimização desta resposta é alcançada utilizando o maior nível de pressão e o menor nível de fluxo de abrasivos, ou seja, pressão +1 e fluxo de abrasivos -1.

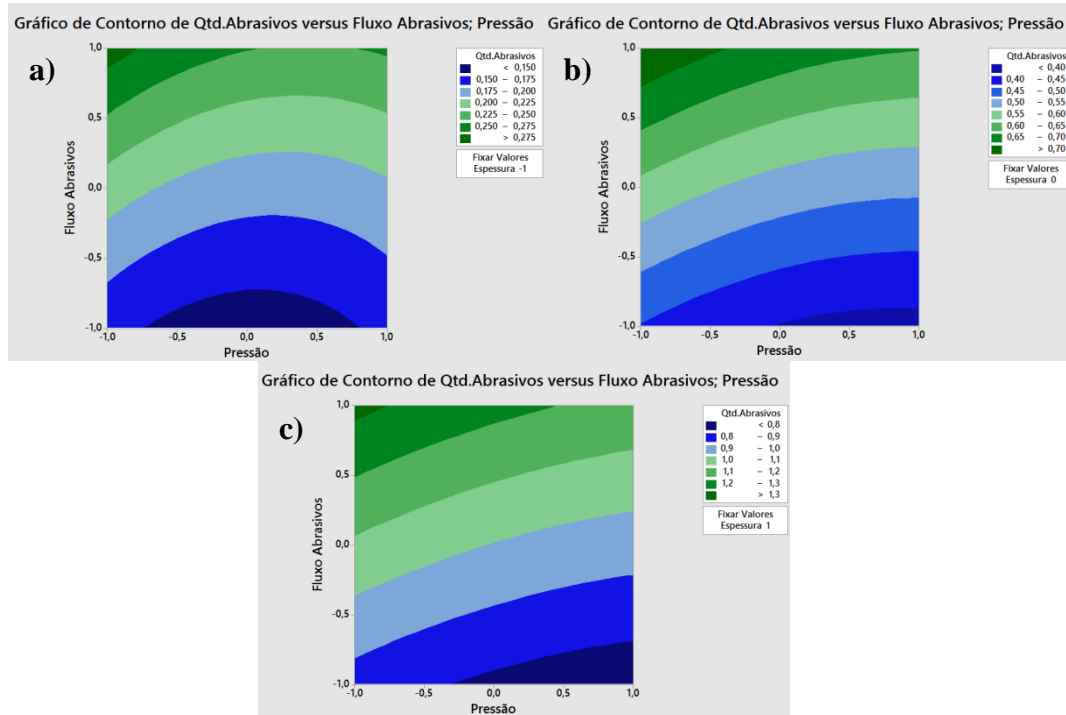


Fig. 5.8: Gráficos de contorno para a resposta Quantidade de Abrasivos em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12.5mm e c) 20mm.

Foi novamente obtida uma equação, que relaciona esta resposta (quantidade de abrasivos) em função dos parâmetros espessura, fluxo de abrasivos e pressão, em unidades codificadas.

$$\begin{aligned} \text{Qtd.Abrasivos} = & 0,53000 - 0,03875 x_P + 0,14125 x_{FA} + 0,40500 x_E \\ & + 0,06125 x_E * x_E - 0,03000 x_P * x_E + 0,08500 x_{FA} * x_E \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Mais uma vez, é necessário saber se esta equação é uma boa aproximação da realidade. Para tal repetiu-se o mesmo procedimento realizado anteriormente para a resposta Tempo. A Tabela 5.6 sintetiza esta comparação entre a equação obtida e a realidade.

Tabela 5.6: Valores de quantidade de abrasivos obtidos utilizando a equação em comparação com os valores obtidos na máquina de corte por jacto de água.

Pressão	Fluxo de Abrasivos	Espessura	Quantidade de Abrasivos (kg)		
			Equação	Real	Variação
-1	-1	-1	0.16	0.15	+6.67%
0	0	-1	0.19	0.20	-5.00%
+1	+1	-1	0.25	0.24	+4.17%
-1	-1	+1	0.86	0.82	+4.88%
0	0	+1	1.00	1.02	-1.96%
+1	+1	+1	1.17	1.15	+1.74%

Podemos assim concluir que a equação obtida é uma excelente aproximação da realidade, tanto melhor quanto maiores forem os valores de espessura. Esta excelente aproximação é confirmada, mais uma vez, pelo valor de $R^2=99.66\%$ obtido através da ANOVA.

5.1.2.3 Custo

Por fim, a terceira e última resposta alvo de estudo é talvez a mais importante para a empresa, o custo. Após analisar os gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros (Fig. 5.9), o gráfico dos efeitos principais (Fig. 5.10) e os gráficos de contorno (Fig. 5.11), é possível constatar que a resposta custo se comporta de forma “igual” à resposta tempo. Ou seja, a minimização do custo é alcançado utilizando os maiores valores possíveis de pressão e fluxo de abrasivos. Pode-se ainda concluir que o custo é directamente proporcional ao tempo de maquinagem, isto é, quando menor for o tempo de maquinagem menor será o custo associado a essa mesma maquinaria.

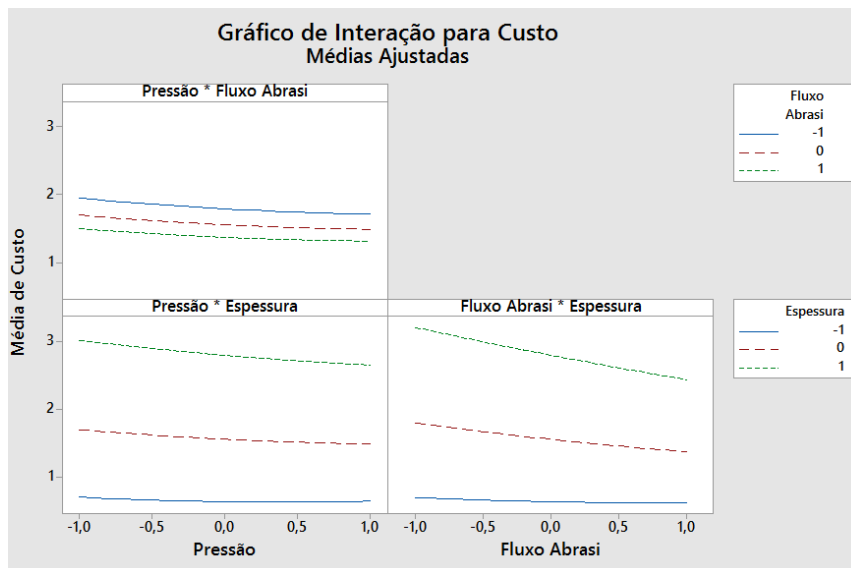


Fig. 5.9: Gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros para a resposta Custo.

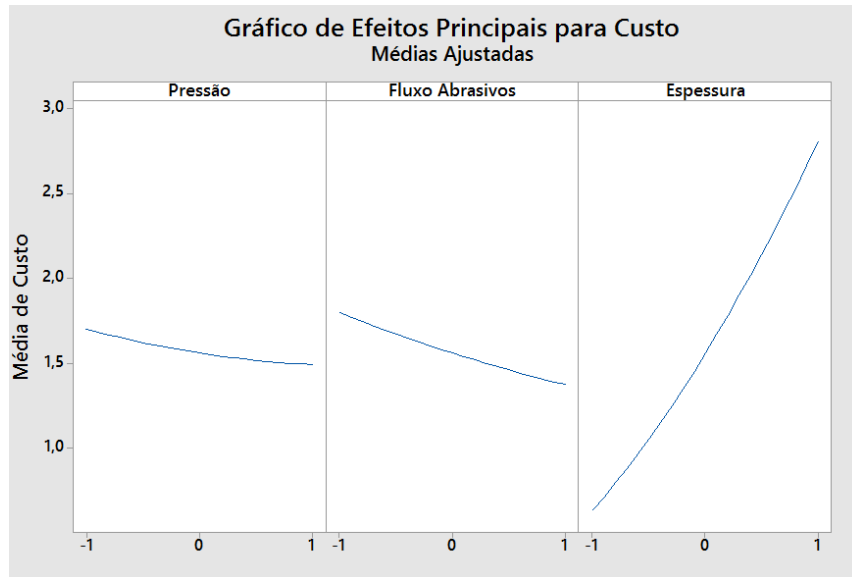


Fig. 5.10: Gráficos de efeitos principais para a resposta Custo.

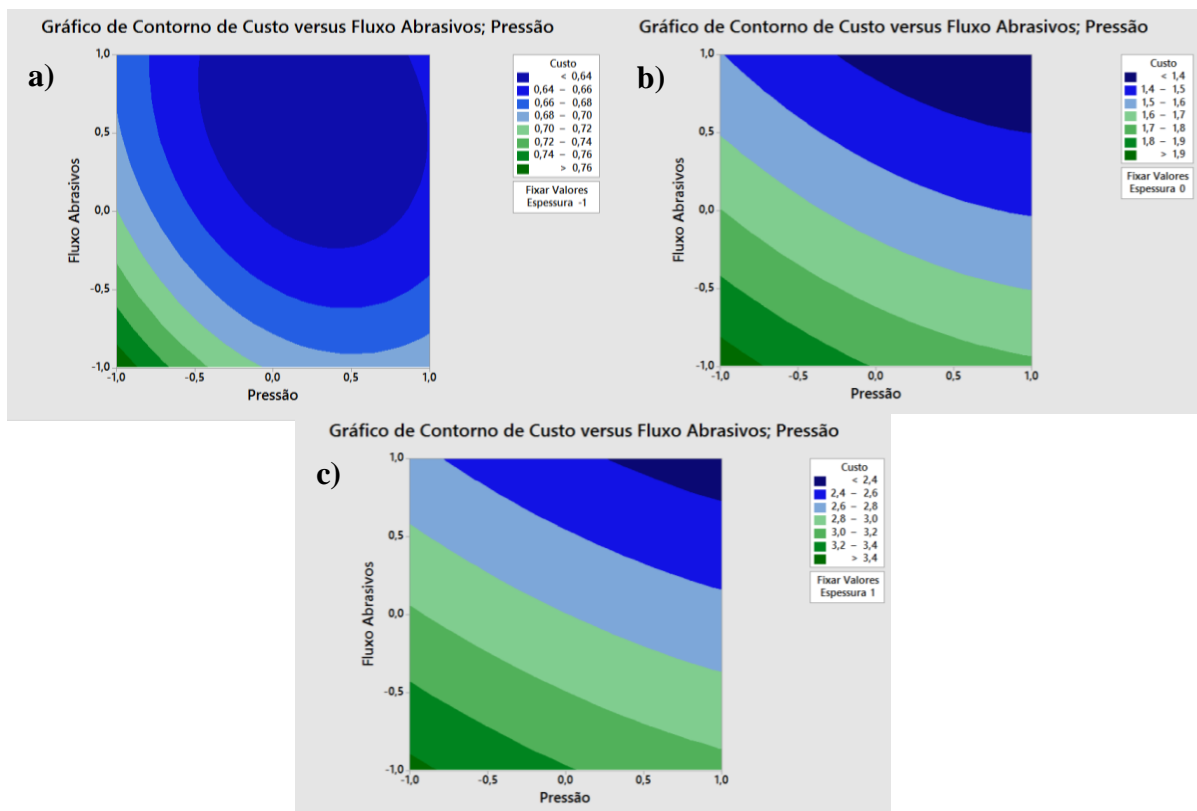


Fig. 5.11: Gráficos de contorno para a resposta Custo em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12.5mm e c) 20mm.

Para esta resposta foi também obtida a equação que relaciona o custo com os parâmetros pressão, fluxo de abrasivos e espessura.

$$\begin{aligned} \text{Custo} = & 1,5600 - 0,10500 x_P - 0,21125 x_{FA} + 1,08375 x_E \\ & + 0,1600 x_E * x_E - 0,0775 x_P * x_E - 0,1750 x_{FA} * x_E \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Tal como sucedido para as respostas Tempo e Quantidade de Abrasivos foram comparados os valores de Custo obtidos com esta equação com os valores obtidos na realidade (Tabela 5.7)

Tabela 5.7: Valores de custo utilizando a equação em comparação com os valores obtidos na máquina de corte por jacto de água.

Pressão	Fluxo de Abrasivos	Espessura	Custo (€)		
			Equação	Real	Variação
-1	-1	-1	0.78	0.76	+2.63%
0	0	-1	0.64	0.67	-4.48%
+1	+1	-1	0.65	0.59	+10.17%
-1	-1	+1	3.45	3.44	+0.29%
0	0	+1	2.80	2.83	-1.06%
+1	+1	+1	2.31	2.28	+1.32%

Mais uma vez, e tal como se sucedeu nas respostas anteriores, os valores obtidos utilizando a equação são muito próximos da realidade. Algo que seria de esperar uma vez que através da ANOVA se obtém o valor de $R^2=99.59\%$. De reparar ainda que, tal como para o Tempo, o valor com maior percentagem de variação é o valor que minimiza a resposta em estudo na realidade, algo que não se verifica com esta equação onde o menor valor é alcançado com valores de pressão e fluxo de abrasivos ambos no nível 0. As razões para tal discrepância são as mesmas que referidas anteriormente para a resposta Tempo.

5.1.3 Análise de Resultados

De forma a avaliar se os resultados obtidos para o Alumínio seriam os mesmos para outros metais, foi repetido o mesmo procedimento para o material Inox 304. Os resultados obtidos foram idênticos pelo que se pode concluir que a máquina se comporta da mesma maneira para os diferentes materiais metálicos. Os resultados obtidos, resumo das experiências realizadas e ANOVA referentes ao material Inox podem ser encontrados nos Anexos desta dissertação (Anexo 4 ao Anexo 16).

Assim, podem-se tirar as seguintes conclusões desta optimização:

- O menor valor de tempo é alcançado quando utilizados os maiores valores possíveis de pressão e de fluxo de abrasivos, neste caso 50000 PSI e 0.67kg/min respectivamente. É

também utilizando estes valores de pressão e fluxo de abrasivos que se minimiza o custo associado à maquinação.

- A menor quantidade de abrasivos utilizada é conseguida quando utilizado o maior valor de pressão e o menor valor de fluxo de abrasivos, neste caso 50000 PSI e 0.31kg/min respectivamente.
- As equações obtidas ((Eq. 5.1, (Eq. 5.2(Eq. 5.3), uma vez que demonstraram ser uma excelente aproximação da realidades, podem ser utilizadas para simular outras experiências sem a necessidade de utilizar o software *OMAX Make*. Assim, é possível simular experiências para quaisquer valores de pressão, fluxo de abrasivos e espessura (sabendo de antemão as limitações nos valores de pressão e fluxo de abrasivos). Apesar de estas equações dizerem respeito a uma peça com uma geometria definida (no caso um rectângulo 100x50mm) é possível utilizar estas equações para simular experiências para peças com qualquer geometria. Para tal basta fazer uma “regra de três simples”, sabendo que estas equações dizem respeito a uma peça com 300mm de perímetro, basta apenas saber qual o perímetro da peça de se deseja estudar. Porém, estas equações estão no entanto limitadas ao material Alumínio e à qualidade Q3. Para outro material e/ou qualidade é necessário efectuar mais um DoE, repetindo o procedimento efectuado neste caso.

Resta apenas comparar os valores, de tempo, quantidade de abrasivos e custo, obtidos utilizando os parâmetros que minimizam as respostas em estudo com os valores em uso neste momento. Essa comparação pode ser encontrada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Comparação dos valores obtidos para as respostas Tempo, Quantidade de Abrasivos e Custo utilizando os parâmetros optimos versus os parâmetros em uso.

	Pressão (PSI)	Fluxo de Abrasivos (kg/min)	Espessura		
			5mm	12.5mm	20mm
Tempo (min)					
Em Uso	48000	0.47	0.533	1.245	2.266
Optimização	50000	0.67	0.475	1.074	1.822
Variação			-10.88%	-13.73%	-19.59%
Quantidade de Abrasivos (kg)					
Em Uso	48000	0.47	0.20	0.53	1.02
Optimização	50000	0.31	0.14	0.39	0.72
Variação			-30.00%	-26.42%	-29.41%
Custo (€)					
Em Uso	48000	0.47	0.67	1.56	2.83
Optimização	50000	0.67	0.59	1.34	2.28
Variação			-11.94%	-14.10%	-19.43%

Como é possível constatar os resultados obtidos são bons, no entanto de nada servem se a qualidade das peças for pior. Assim, o passo seguinte passa por maquinar algumas peças para averiguar como se comprara a qualidade das mesmas.

5.1.3.1 Aumento da capacidade de corte anual e poupança anual

Uma melhor maneira de visualizar estas percentagens será de criar um cenário hipotético e calcular qual o aumento da capacidade de corte anual (em metros) e qual a poupança anual quer monetária (em €) quer de abrasivos (em kg.)

Neste exemplo irá ser utilizado o cenário em que a empresa apenas maquinaria Alumínio de 12.5mm de espessura durante o ano. De referir ainda que a máquina de corte por jacto de água costuma trabalhar 10h/dia com uma eficiência estimada de $\eta \approx 85\%$, 6 dias por semana, durante o ano todo (52semanas), num total aproximado de 2650h/anuais de funcionamento.

A redução do tempo de maquinagem pode levar a dois cenários:

- **CENÁRIO 1** - A empresa mantém o número de peças a maquinar, reduzindo assim o total de 3120h/anuais de funcionamento e consequentemente poupa dinheiro. Actualmente, e como é possível ver anteriormente, a empresa produz esta peça de Alumínio com 300mm de perímetro (rectângulo 50x100mm) em 1.245min. Porém, utilizando os parâmetros óptimos (Pressão 50000PSI e Fluxo de Abrasivos 0.67kg/min) a mesma peça é maquinada em 1.074min com uma redução de custo de 14.1%. Fazendo as contas do custo da empresa para produzir, durante todo o ano, estes rectângulos

50x100x12.5mm de Alumínio obtemos um custo total de 198750€. Assim, esta redução de custo de 14.1% traduzir-se-ia numa poupança anual de cerca de 28000€.

- CENÁRIO 2 - O outro caso seria o de aumentar a produção. Uma vez que o tempo de maquinagem por peça é reduzido, o número de peças capazes de serem maquinadas por hora aumenta. Esta redução de tempo de 13.7%, traduz-se num aumento de capacidade de corte de 15.9%. Já que para este exemplo, numa hora eram maquinados 14457mm com os parâmetros em uso, e que após aplicados os parâmetros óptimos esse valor sobe para 16759mm/h. Extrapolando para um ano, com os parâmetros em uso a capacidade de corte anual ronda os 38425m/ano. Porém, e após aplicados os parâmetros óptimos, essa capacidade de corte aumenta para 44572m/ano, sendo assim conseguido um aumento da capacidade de corte de cerca de 6147m/ano.

Um outro cenário será aplicar os parâmetros que optimizam a quantidade de abrasivos utilizados, pressão 5000 PSI e fluxo de abrasivos 0.31kg/min. Mantendo o mesmo cenário hipotético, a empresa gasta cerca de 67575kg de abrasivo por ano. Porém, após aplicados os parâmetros que optimizam a quantidade de abrasivos utilizados conseguimos uma redução de 26.4%, que se traduz numa redução de cerca de 17800kg/ano de abrasivos. Sabendo que 1ton de abrasivos custa aproximadamente 500€, esta redução de abrasivos traduzir-se-ia numa poupança de 8900€.

A empresa pode agora escolher destes 3 cenários qual o mais favorável e que mais se adequa às suas necessidades. Sendo que qualquer um deles apresenta excelentes benefícios quando comparados com os valores em uso.

5.2 Realização das Experiências

5.2.1 Preparação das Experiências

Segue-se então a maquinação de algumas peças. O primeiro passo é definir quais as combinações dos diferentes parâmetros a utilizar. A espessura será fixa já que o mais importante é estudar a influência do fluxo de abrasivos e da pressão de água na qualidade das peças. Assim, a espessura das peças maquinadas será de 8mm e o material será o Inox 304 (uma vez que aquando da realização das experiências era o único material disponível). A geometria será mais uma vez rectângulos 100x50mm, e a qualidade Q3.

O objectivo desta maquinação é, como referido anteriormente, avaliar a qualidade das diferentes peças. Essa qualidade vai ser definida pela precisão geométrica e pelo Kerf, já que são os dois factores mais relevantes na empresa. Sendo o objectivo obter o menor ângulo possível de Kerf, e as medidas de comprimento e largura o mais próximas da cota nominal possível.

A Tabela 5.9 sintetiza as experiências a ser realizadas.

Tabela 5.9: Síntese das experiências realizadas na maquinação de peças.

Ensaio	Fluxo de Abrasivos (kg/min)	Pressão (PSI)	Espessura (mm)
A	0.67	50000	8
B	0.31	50000	8
C	0.47	48000	8
D	0.47	50000	8
E	0.47	46000	8

Cada ensaio tem o seu propósito. O ensaio C refere-se aos valores em uso e servirá como padrão para a comparação dos resultados obtidos. O ensaio A é aquele que nos permite obter menores valores de tempo e custo, enquanto o ensaio B nos permite obter menores valores de quantidade de abrasivos.

Por fim, os ensaios D e E foram acrescentados apenas para estudar como varia o Kerf e a precisão geométrica com o fluxo de abrasivos e com a pressão. Já que com a adição do ensaio D conseguimos três ensaios a pressão constante e com fluxo de abrasivos diferentes (ensaios A, B e D) e que com o ensaio E são conseguidos três ensaios a fluxo de abrasivos constante mas com pressões diferentes (ensaios C,D e E).

De referir ainda os valores para as respostas tempo, custo e quantidade de abrasivos obtidos nestas maquinações, que apesar de não serem o elemento de estudo nesta fase, confirmam os resultados obtidos anteriormente (Tabela 5.10).

Tabela 5.10: Valores das respostas tempo, custo e quantidade de abrasivos obtidos na maquinação das peças para estudo da qualidade.

Ensaio	Tempo (min)	Quantidade de Abrasivos (kg)	Custo (€)
A	1.875	1.18	2.34
B	2.392	0.71	2.99
C	2.224	0.99	2.78
D	2.095	0.93	2.62
E	2.369	1.06	2.96

5.2.2 Análise geométrica das peças maquinadas

Foram maquinadas três peças para cada ensaio (ensaios A1, A2, A3, B1, B2... – ver Fig. 5.14) e medidos os valores de comprimento, largura e Kerf. Os valores de largura foram medidos seis vezes cada um, três medições com uma face virada (x – ver Fig. 5.13) para cima, e outras três medições com a face oposta virada para cima (x' – ver Fig. 5.13). De cada um destes conjuntos de 3 medições foi feita a média (x_{med} e x'_{med}), e o valor de largura (\bar{X}) resulta da média de x_{med} e x'_{med} . Isto porque devido à existência de Kerf há valores de largura a variar ao longo da espessura. O mesmo procedimento foi repetido para o comprimento. Estas medições foram realizadas utilizando um paquímetro digital com uma resolução de 0.005mm (Fig. 5.12).

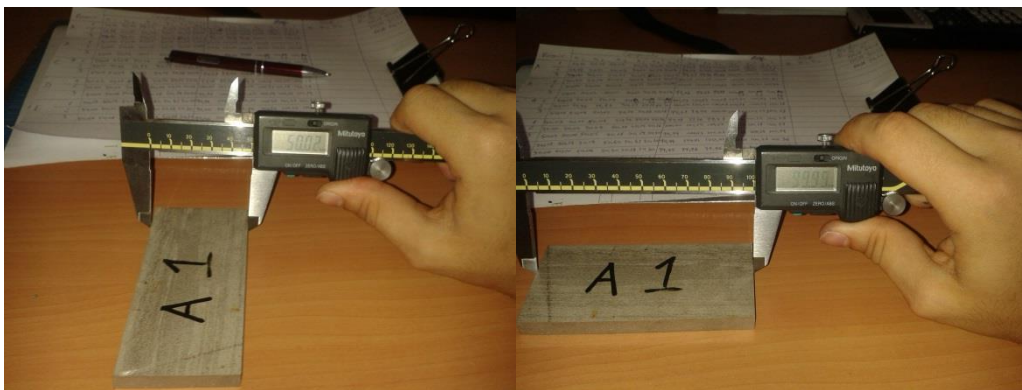


Fig. 5.12: Medição do comprimento e largura das peças maquinadas.

Por fim, a medição do Kerf foi feita de forma trigonométrica. Sabendo quais os valores de x_{med} e x'_{med} é possível calcular qual o ângulo existente, esse ângulo é o Kerf (neste caso para a largura). Assim sendo, foram calculados os valores de Kerf para a largura ($\Theta_{x_{med}}$) e para o comprimento ($\Theta_{y_{med}}$) e o valor de Kerf ($\bar{\Theta}$) é a média desses dois valores.

Foram confirmados alguns valores de Kerf utilizando um medidor de perfis (Fig. 5.15), com resolução de 0.5°. Os valores obtidos com o medidor de perfis mostraram-se muito semelhantes aos obtidos de forma analítica.

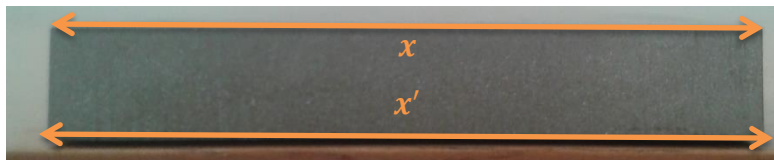


Fig. 5.13: Medição da largura das peças maquinadas

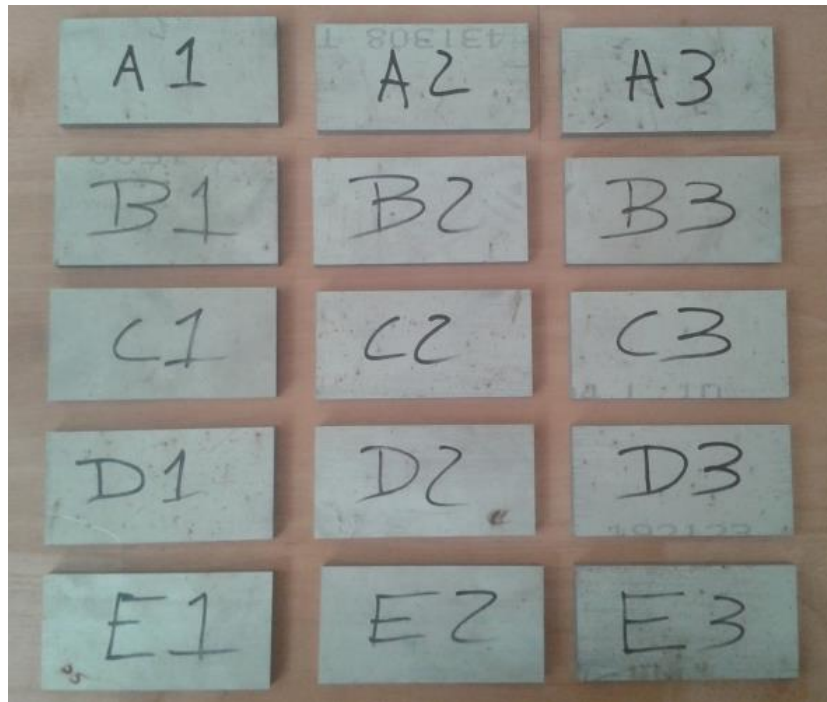


Fig. 5.14: Peças maquinadas



Fig. 5.15: Medição de Kerf recorrendo a um medidor de perfis.

Após realizadas todas as medições, os resultados foram registados numa tabela que pode ser encontrada no Anexo 17. Os resultados simplificados podem ser consultados na Tabela 5.11, onde os valores sublinhados se referem aos valores médios de Kerf, comprimento e largura para cada ensaio.

Tabela 5.11: Valores de kerf, comprimento e largura obtidos.

Ensaio		Kerf	Largura	Comprimento
		θ (°)	\bar{X} (mm)	\bar{Y} (mm)
A	1	0,788	50,130	100,103
	2	0,776	50,118	100,108
	3	0,877	50,123	100,108
	\bar{A}	0,814	50,124	100,107
B	1	0,991	50,157	100,163
	2	1,009	50,175	100,177
	3	0,925	50,123	100,118
	\bar{B}	0,975	50,152	100,153
C	1	0,997	50,193	100,185
	2	1,020	50,130	100,152
	3	0,955	50,148	100,125
	\bar{C}	0,991	50,157	100,154
D	1	0,925	50,157	100,112
	2	0,871	50,137	100,150
	3	0,907	50,172	100,148
	\bar{D}	0,901	50,155	100,137
E	1	1,134	50,267	100,183
	2	0,991	50,173	100,113
	3	0,955	50,177	100,160
	\bar{E}	1,026	50,206	100,152

5.2.3 Análise de resultados

Analizando os resultados obtidos, é possível concluir que o ensaio A não só reduz o tempo/custo como também produz peças com maior precisão geométrica e menor Kerf. Algo que acaba por ser de esperar, uma vez que um maior fluxo de abrasivos e uma maior pressão aumentam a capacidade de penetração do jacto de água e consequentemente produzem um corte mais preciso.

O ensaio B acaba por produzir resultados semelhantes aos do ensaio C. Algo que acaba por acontecer já que, apesar de uma maior pressão, no ensaio B é utilizada uma quantidade menor de abrasivos quando comparados com o ensaio C. Levando assim a concluir que um aumento de pressão, quando aliado a uma redução de fluxo de abrasivos produz resultados muito semelhantes aos que seriam obtidos se não tivessem sido alterados os valores de pressão e fluxo de abrasivos.

Dos restantes ensaios é possível concluir que quanto maior a pressão maior será a precisão e menor será o Kerf, e o mesmo é válido para o fluxo de abrasivos. Essas conclusões encontram-se resumidas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Influência da pressão do jacto de água e do fluxo de abrasivos na precisão geométrica e Kerf.

	Pressão do Jacto de Água	Fluxo de Abrasivos
	↑	↑
Kerf	↓	↓
Precisão geométrica	↑	↑
	↑ - Aumenta	↓ - Diminui

6. Conclusões

6.1 Conclusões

Na presente dissertação, foram obtidos dois conjuntos de parâmetros óptimos: um que diminui tempo e custo, e outro que diminui a quantidade de abrasivos utilizados. Ambos têm os seus benefícios, tal como foi ilustrado no exemplo do capítulo 5.1.3.1.

Porém, não trazem só benefícios. Os parâmetros que optimizam a quantidade de abrasivos utilizados levam a um aumento de tempo e de custo. E o inverso é verificado nos parâmetros que optimizam o tempo e o custo, já que estes levam a um aumento da quantidade de abrasivos utilizados. No entanto, e devido ao baixo custo dos abrasivos, a poupança obtida com a redução da quantidade de abrasivos utilizados é anulada por um aumento de custo. Assim, estes valores que optimizam a quantidade de abrasivos utilizados devem ser apenas utilizados num cenário em que o preço de abrasivos dispare, compensando assim o aumento de custo associado à utilização de uma menor quantidade de abrasivos.

Após, a análise geométrica das peças maquinadas foi possível concluir que os parâmetros que optimizam o tempo e o custo são também os que produzem peças com melhor qualidade.

Foi assim concluído que os parâmetros que optimizam o desempenho da máquina de corte por jacto de água, e que foram implementados na empresa fruto deste trabalho, são os presentes na Tabela 6.1

Tabela 6.1: Parâmetros que optimizam o desempenho da máquina de corte por jacto de água.

Pressão (PSI)	Fluxo de Abrasivos (kg/min)
50000	0.67

Com esta dissertação, foi também possível estudar como variam o tempo de maquinagem, o custo, o Kerf e a precisão geométrica com a pressão, fluxo de abrasivos e espessura. Esses resultados encontram-se presentes na Tabela 6.2.

Estes resultados permitem concluir que a abordagem utilizada para a realização desta dissertação foi correcta para a obtenção dos fins desejados. Assim, é possível afirmar que esta abordagem pode ser utilizada para optimizar outros equipamentos de produção.

Tabela 6.2: Variação do tempo de maquinagem, do custo, do Kerf e da precisão geométrica em função da pressão, do fluxo de abrasivos e da espessura

	Pressão do Jacto de Água	Fluxo de Abrasivos	Espessura
	↑	↑	↑
Tempo de Maquinagem	↓	↓	↑
Custo	↓	↓	↑
Kerf	↓	↓	↑ ↓
Precisão geométrica	↑	↑	↑ ↓
↑ - Aumenta ↓ - Diminui ↑ ↓ - Não Estudado			

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com esta dissertação, estão definidas as condições óptimas de funcionamento da máquina. Como tal, está lançada a base para uma nova quantidade de experiências, sabendo como a máquina deve funcionar, podemo-nos agora concentrar em estudar outros temas.

- O primeiro trabalho que pode ser realizado, não é mais que um trabalho de verificação. Nesta dissertação foram estudados quais os parâmetros óptimos de funcionamento da máquina de corte por jacto de água, mas apenas foram efectuados estudos a materiais metálicos (Alumínio e INOX). Assim, pode ser relevante estudar se o comportamento da máquina é o mesmo para materiais não metálicos utilizados pela empresa. Como são o caso de borrachas, utilizadas em juntas. Ou de plásticos (como o polipropileno), utilizados sobretudo para fazer anilhas e casquilhos.
- Outro trabalho possível passará por uma optimização geométrica. Como vimos nesta dissertação, após maquinadas com os parâmetros óptimos, as peças tinham um desvio de cerca de 0.1mm em relação à cota nominal. Inicialmente será interessante verificar se este desvio é sempre o mesmo (0.1mm) para outras espessuras (que não os 8mm maquinados nesta dissertação) e para outros materiais (que não o INOX). Fazendo assim um estudo dos desvios em relação à cota nominal para outras espessuras e outros

materiais. Feito esse estudo, seria interessante ver se compensando a geometria a maquinar se se conseguiria obter peças mais próximas da cota nominal. Ou seja, para o caso desta dissertação, se a geometria a maquinar fosse um rectângulo de 49.9x99.9mm se as cotas médias após a maquinação seriam iguais (ou perto disso) das cotas nominais 50x100mm. Sendo assim o objectivo desse trabalho criar uma metodologia que permitisse à empresa saber quanto deveria alterar as cotas, consoante o material e a espessura do mesmo, de forma a produzir peças com uma maior precisão geométrica.

- Seria também interessante aprofundar mais o estudo do desempenho da máquina em espessuras reduzidas. Isto porque quanto menor a espessura, menor a influência da mesma enquanto parâmetro e mais relevantes se tornam os restantes parâmetros (e menos linear se torna o comportamento da máquina). Assim, e apesar de nesta dissertação o comportamento da máquina ter sido o mesmo para toda a gama de espessuras estudadas, pode ser interessante aprofundar o estudo na maquinação de espessuras reduzidas.

7. Referências Bibliográficas

- [1] KMT Waterjet Systems, “Water Jet Cutting A Technology on the Rise,” pp. 1–14, 2010.
- [2] K. Skreekesh and D. G. P., “A Review on Abrasive Water Jet,” *IJMECH*, vol. 3, no. 3, pp. 153–158, 2014.
- [3] H. A.-G. El-Hofy, *Advanced Machining Processes*. 2005.
- [4] R. V Shah and P. D. M. Patel, “Abrasive Water Jet Machining – The Review,” *Int. J. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 803–806, 2012.
- [5] “http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=section&id=4&Itemid=43.” (acedido a 12/01/2016) .
- [6] J. Folkes, “Waterjet-An innovative tool for manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, pp. 6181–6189, 2009.
- [7] A. Dixit, V. Dave, and M. R. Baid, “WATER JET MACHINING : AN ADVANCE MANUFACTURING PROCESS,” *IJERGS*, vol. 3, no. 2, pp. 288–292, 2015.
- [8] M. C. P. Selvan and N. M. S. Raju, “Assessment of Process Parameters in Abrasive Waterjet Cutting of Stainless Steel,” *IJAET*, vol. 1, no. 3, pp. 34–40, 2011.
- [9] Flow International Corporation, “Waterjet Seminar,” , pp. 1–30, 2002.
- [10] “<http://read.nxtbook.com/techgen/fabshopmagdirect/february2013/anewwaterjettrend/omax-614.jpg>.” (acedido a 20/01/2016).
- [11] “http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/02_Waterjet%20Relationship%20Parameters_files/image002.jpg.” (acedido a 20/01/2016) .
- [12] “<http://www.medicaldevice-network.com/uploads/feature/feature98991/1-figure-1.jpg>.” (acedido a 20/01/2016) .
- [13] IIT Kharagpur, “Water Jet and Abrasive Water Jet Machining.”
- [14] M. M. Korat and G. D. Acharya, “A Review on Current Research and Development in Abrasive Waterjet Machining,” *J. Eng. Res. Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 423–432, 2014.
- [15] C. Birtu and V. Avramescu, “Abrasive Water Jet Cutting-Technique, Equipment, Performances,” 2012.
- [16] S. R. Patel and D. A. A. Shaikh, “Control and measurement of abrasive flow rate in an Abrasive Waterjet Machine,” *IJIRSET*, vol. 2, no. 12, pp. 7675–7679, 2013.

- [17] G. Aydin, I. Karakurt, and K. Aydiner, "Prediction of the cut depth of granitic rocks machined by abrasive waterjet (AWJ)," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 5, pp. 1223–1235, 2013.
- [18] S. J. Ebeid, M. R. A. Atia, and M. M. Sayed, "Prediction of Abrasive Water Jet Plain Milling Process Parameters Using Artificial Neural Networks," *J. Mach. Manuf. Autom.*, vol. 3, pp. 56–73, 2014.
- [19] J. Wang, "Depth of cut models for multipass abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with nozzle oscillation," *Front. Mech. Eng. China*, vol. 5, no. 1, pp. 19–32, 2009.
- [20] M. A. Azmir and A. K. Ahsan, "A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 20, pp. 6168–6173, 2009.
- [21] J. J. R. Jegaraj and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 12–13, pp. 1443–1450, 2005.
- [22] R. Khanna, R. D. Gupta, and V. Gupta, "Measuring Material Removal Rate of Marble by Using Abrasive Water Jet Machining," *IOSR-JMCE*, pp. 45–49, 2011.
- [23] D. K. Shanmugam and S. H. Masood, "An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 8, pp. 3887–3893, 2009.
- [24] M. Nanduri, D. G. Taggart, and T. J. Kim, "The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 5, pp. 615–623, 2002.
- [25] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, pp. 1297–1306, 2002.
- [26] OMAX Corporation, "OMAX Interactive Reference." 2015.
- [27] D. Montgomery, *Design And Analysis Of Experiments*, Third Edit. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [28] J. A. Cornell, *How To Apply Response Surface Methodology*. American Society for Quality Control, 1990.
- [29] "<http://reliawiki.org/images/e/e4/Doe9.13.png>." (acedido a 25/08/2016) .
- [30] J. G. Requeijo e Z. L. Pereira, *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. 2008.

8. Anexos

Anexo 1: ANOVA Tempo de maquinagem para Alumínio

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	6,45396	0,71711	2797,92	0,000
Linear	3	6,29397	2,09799	8185,68	0,000
Pressão	1	0,05611	0,05611	218,93	0,000
Fluxo Abrasivos	1	0,22781	0,22781	888,85	0,000
Espessura	1	6,01004	6,01004	23449,26	0,000
Quadrado	3	0,06408	0,02136	83,34	0,000
Pressão*Pressão	1	0,00396	0,00396	15,45	0,011
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,00191	0,00191	7,46	0,041
Espessura*Espessura	1	0,06168	0,06168	240,66	0,000
Interação com 2 Fatores	3	0,09591	0,03197	124,73	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,00044	0,00044	1,72	0,247
Pressão*Espessura	1	0,01538	0,01538	59,99	0,001
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	0,08009	0,08009	312,48	0,000
Erro	5	0,00128	0,00026		
Falta de ajuste	3	0,00128	0,00043	*	*
Erro puro	2	0,00000	0,00000	*	*
Total	14	6,45524			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0160094	99,98%	99,94%	99,68%

Coefficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,24500	0,00924	134,70	0,000	
Pressão	-0,08375	0,00566	-14,80	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	-0,16875	0,00566	-29,81	0,000	1,00
Espessura	0,86675	0,00566	153,13	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,03275	0,00833	3,93	0,011	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	0,02275	0,00833	2,73	0,041	1,01
Espessura*Espessura	0,12925	0,00833	15,51	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	0,01050	0,00800	1,31	0,247	1,00
Pressão*Espessura	-0,06200	0,00800	-7,75	0,001	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	-0,14150	0,00800	-17,68	0,000	1,00

Anexo 2: ANOVA Quantidade de abrasivos para Alumínio

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	1,53117	0,17013	2617,38	0,000
Linear	3	1,48383	0,49461	7609,36	0,000
Pressão	1	0,01201	0,01201	184,81	0,000
Fluxo Abrasivos	1	0,15961	0,15961	2455,58	0,000
Espessura	1	1,31220	1,31220	20187,69	0,000
Quadrado	3	0,01462	0,00487	74,97	0,000
Pressão*Pressão	1	0,00130	0,00130	19,97	0,007
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,00028	0,00028	4,35	0,091
Espessura*Espessura	1	0,01385	0,01385	213,11	0,000
Interação com 2 Fatores	3	0,03273	0,01091	167,82	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,00022	0,00022	3,46	0,122
Pressão*Espessura	1	0,00360	0,00360	55,38	0,001
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	0,02890	0,02890	444,62	0,000
Erro	5	0,00033	0,00007		
Falta de ajuste	3	0,00033	0,00011	*	*
Erro puro	2	0,00000	0,00000	*	*
Total	14	1,53149			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0080623	99,98%	99,94%	99,66%

Coefficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,53000	0,00465	113,86	0,000	
Pressão	-0,03875	0,00285	-13,59	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	0,14125	0,00285	49,55	0,000	1,00
Espessura	0,40500	0,00285	142,08	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,01875	0,00420	4,47	0,007	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	0,00875	0,00420	2,09	0,091	1,01
Espessura*Espessura	0,06125	0,00420	14,60	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	-0,00750	0,00403	-1,86	0,122	1,00
Pressão*Espessura	-0,03000	0,00403	-7,44	0,001	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	0,08500	0,00403	21,09	0,000	1,00

Anexo 3: ANOVA Custo para Alumínio

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	10,0858	1,12064	2176,01	0,000
Linear	3	9,8413	3,28044	6369,79	0,000
Pressão	1	0,0882	0,08820	171,26	0,000
Fluxo Abrasivos	1	0,3570	0,35701	693,23	0,000
Espessura	1	9,3961	9,39611	18244,88	0,000
Quadrado	3	0,0973	0,03244	62,99	0,000
Pressão*Pressão	1	0,0052	0,00519	10,08	0,025
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,0023	0,00231	4,48	0,088
Espessura*Espessura	1	0,0945	0,09452	183,54	0,000
Interação com 2 Fatores	3	0,1471	0,04905	95,24	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,0006	0,00062	1,21	0,321
Pressão*Espessura	1	0,0240	0,02402	46,65	0,001
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	0,1225	0,12250	237,86	0,000
Erro	5	0,0026	0,00051		
Falta de ajuste	3	0,0026	0,00086	*	*
Erro puro	2	0,0000	0,00000	*	*
Total	14	10,0884			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0226936	99,97%	99,93%	99,59%

Coefficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,5600	0,0131	119,06	0,000	
Pressão	-0,10500	0,00802	-13,09	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	-0,21125	0,00802	-26,33	0,000	1,00
Espessura	1,08375	0,00802	135,07	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,0375	0,0118	3,18	0,025	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	0,0250	0,0118	2,12	0,088	1,01
Espessura*Espessura	0,1600	0,0118	13,55	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	0,0125	0,0113	1,10	0,321	1,00
Pressão*Espessura	-0,0775	0,0113	-6,83	0,001	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	-0,1750	0,0113	-15,42	0,000	1,00

Anexo 4: Síntese das experiências simuladas com o material INOX.

Material: Inox 304 (Índice de Maquinabilidade:80.8)					Tempo (min)			Qtd.Abrasivos (kg)			Custo (€)		
					Espessura			Espessura			Espessura		
Ensaio	Pressão (PSI)	Fluxo Abrasivos (kg/min)	x_P	x_{FA}	5mm	12.5mm	20mm	5mm	12.5mm	20mm	5mm	12.5mm	20mm
1	50000	0.67	+1	+1	1.171	2.954	5.198	0.71	1.91	3.42	1.46	3.69	6.50
2	46000	0.67	-1	+1	1.316	3.357	5.992	0.81	2.18	3.95	1.65	4.20	7.49
3	46000	0.31	-1	-1	1.624	4.391	8.118	0.47	1.33	2.49	2.03	5.49	10.15
4	50000	0.31	+1	-1	1.416	3.861	7.106	0.41	1.17	2.17	1.77	4.83	8.88
5	48000	0.67	0	+1	1.239	3.145	5.549	0.76	2.04	3.65	1.55	3.93	6.94
6	48000	0.31	0	-1	1.486	4.104	7.587	0.43	1.24	2.32	1.86	5.13	9.48
7	46000	0.47	-1	0	1.461	3.845	7.125	0.64	1.76	3.30	1.83	4.81	8.91
8	50000	0.47	+1	0	1.297	3.323	6.186	0.56	1.51	2.86	1.62	4.15	7.73
9	48000	0.47	0	0	1.375	3.538	6.603	0.60	1.61	3.06	1.72	4.42	8.25

Anexo 5: ANOVA Tempo de maquinagem para INOX

Análise de Variância

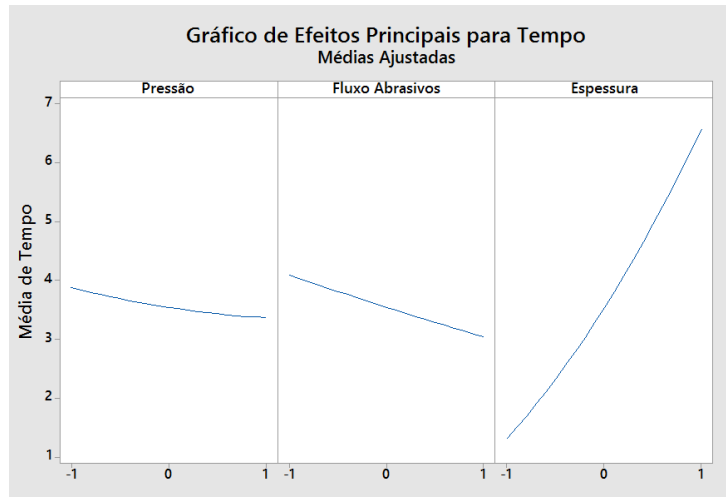
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	59,2474	6,5830	1573,01	0,000
Linear	3	57,6867	19,2289	4594,72	0,000
Pressão	1	0,5182	0,5182	123,81	0,000
Fluxo Abrasivos	1	2,2324	2,2324	533,43	0,000
Espessura	1	54,9362	54,9362	13126,92	0,000
Quadrado	3	0,6046	0,2015	48,16	0,000
Pressão*Pressão	1	0,0221	0,0221	5,28	0,070
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,0024	0,0024	0,57	0,485
Espessura*Espessura	1	0,5963	0,5963	142,49	0,000
Interação com 2 Fatores	3	0,9561	0,3187	76,15	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,0040	0,0040	0,96	0,371
Pressão*Espessura	1	0,1502	0,1502	35,88	0,002
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	0,8019	0,8019	191,62	0,000
Erro	5	0,0209	0,0042		
Falta de ajuste	3	0,0209	0,0070	*	*
Erro puro	2	0,0000	0,0000	*	*
Total	14	59,2684			

Sumário do Modelo

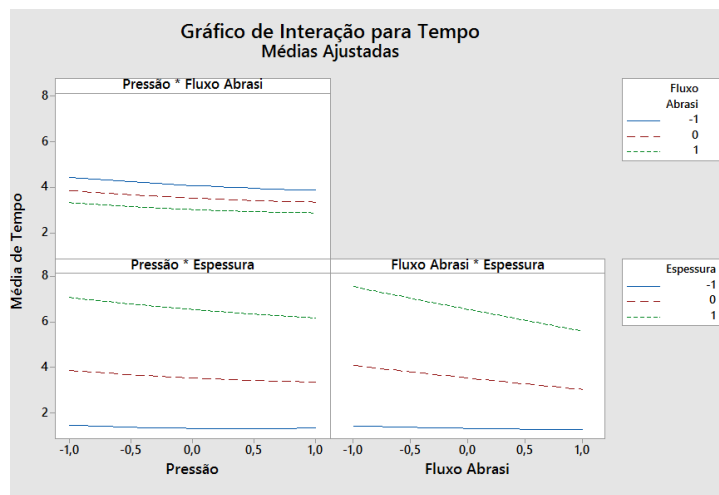
S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0646916	99,96%	99,90%	99,44%

Coefficientes Codificados

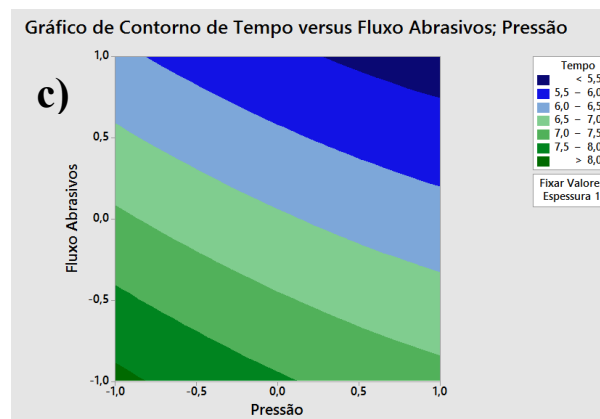
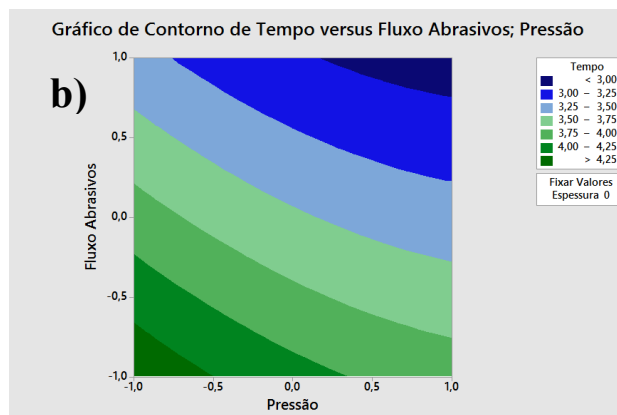
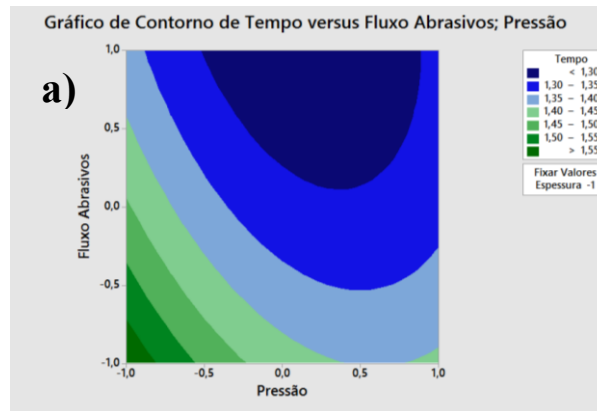
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	3,5380	0,0373	94,73	0,000	
Pressão	-0,2545	0,0229	-11,13	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	-0,5282	0,0229	-23,10	0,000	1,00
Espessura	2,6205	0,0229	114,57	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,0774	0,0337	2,30	0,070	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	0,0254	0,0337	0,75	0,485	1,01
Espessura*Espessura	0,4019	0,0337	11,94	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	0,0317	0,0323	0,98	0,371	1,00
Pressão*Espessura	-0,1937	0,0323	-5,99	0,002	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	-0,4478	0,0323	-13,84	0,000	1,00



Anexo 6: Gráficos de efeitos principais para a resposta Tempo, material INOX.



Anexo 7: Gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros para a resposta Tempo, material INOX.



Anexo 8: Gráficos de contorno para a resposta Tempo em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12,5mm e c) 20mm, para o material INOX

Anexo 9: ANOVA Quantidade de Abrasivos para INOX

Análise de Variância

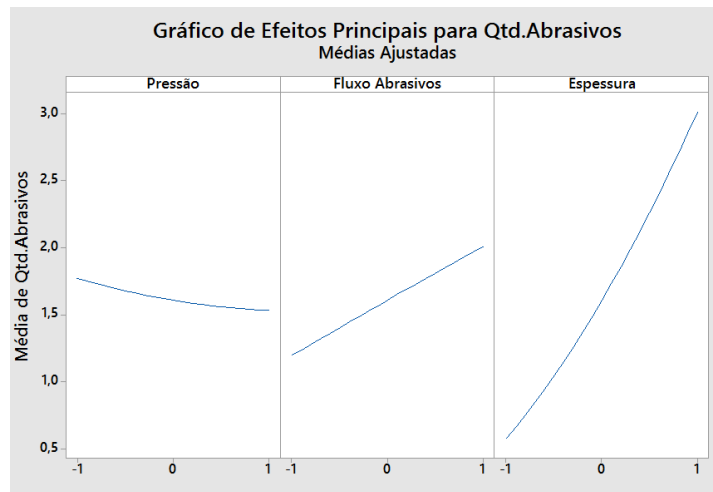
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	13,7102	1,5234	1342,17	0,000
Linear	3	13,2916	4,4305	3903,55	0,000
Pressão	1	0,1128	0,1128	99,39	0,000
Fluxo Abrasivos	1	1,3203	1,3203	1163,27	0,000
Espessura	1	11,8585	11,8585	10447,97	0,000
Quadrado	3	0,1332	0,0444	39,12	0,001
Pressão*Pressão	1	0,0071	0,0071	6,23	0,055
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,0001	0,0001	0,13	0,736
Espessura*Espessura	1	0,1281	0,1281	112,85	0,000
Interação com 2 Fatores	3	0,2854	0,0951	83,83	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,0030	0,0030	2,67	0,163
Pressão*Espessura	1	0,0324	0,0324	28,55	0,003
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	0,2500	0,2500	220,26	0,000
Erro	5	0,0057	0,0011		
Falta de ajuste	3	0,0057	0,0019	*	*
Erro puro	2	0,0000	0,0000	*	*
Total	14	13,7159			

Sumário do Modelo

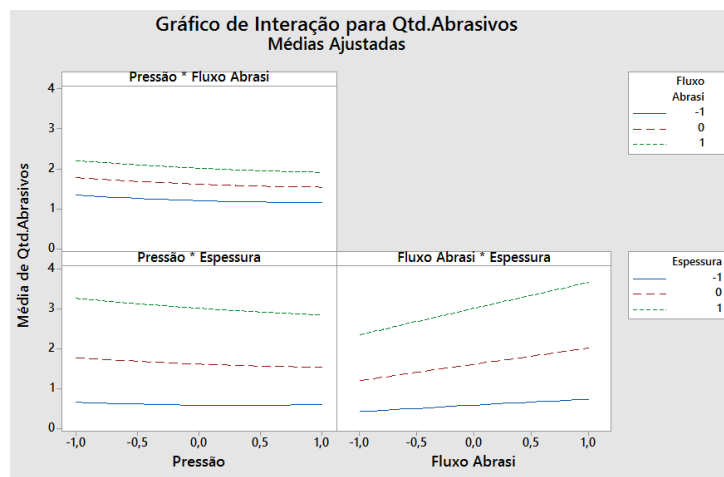
S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0336898	99,96%	99,88%	99,34%

Coefficientes Codificados

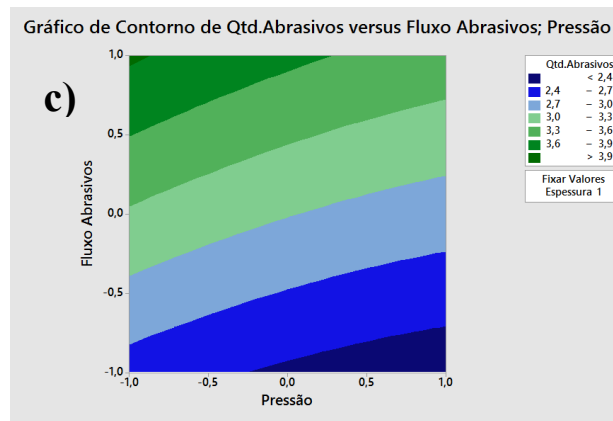
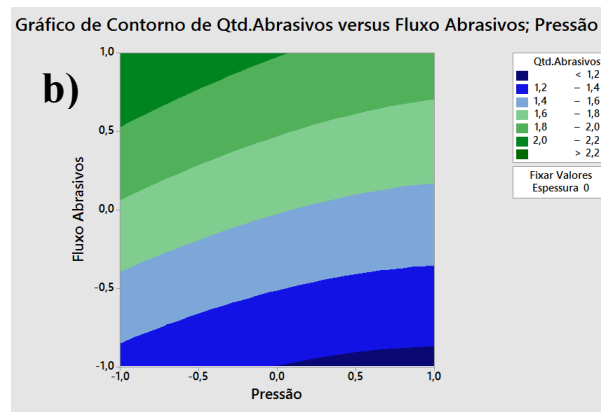
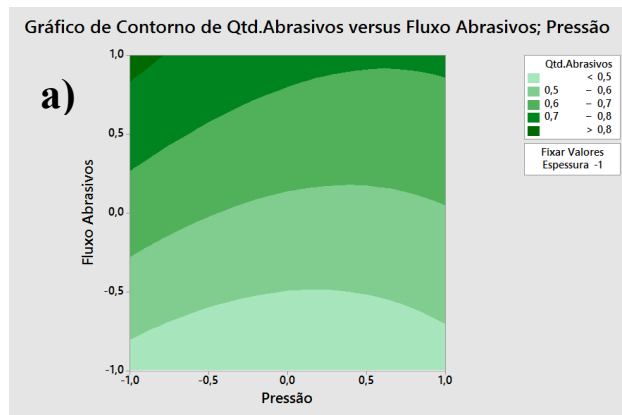
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,6100	0,0195	82,77	0,000	
Pressão	-0,1188	0,0119	-9,97	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	0,4063	0,0119	34,11	0,000	1,00
Espessura	1,2175	0,0119	102,22	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,0438	0,0175	2,50	0,055	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	-0,0063	0,0175	-0,36	0,736	1,01
Espessura*Espessura	0,1862	0,0175	10,62	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	-0,0275	0,0168	-1,63	0,163	1,00
Pressão*Espessura	-0,0900	0,0168	-5,34	0,003	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	0,2500	0,0168	14,84	0,000	1,00



Anexo 10: Gráficos de efeitos principais para a resposta Quantidade de Abrasivos, material INOX.



Anexo 11: Gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros para a resposta Quantidade de Abrasivos, material INOX.



Anexo 12: Gráficos de contorno para a resposta Quantidade de Abrasivos em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12,5mm e c) 20mm, para o material INOX.

Anexo 13: ANOVA Custo para INOX

Análise de Variância

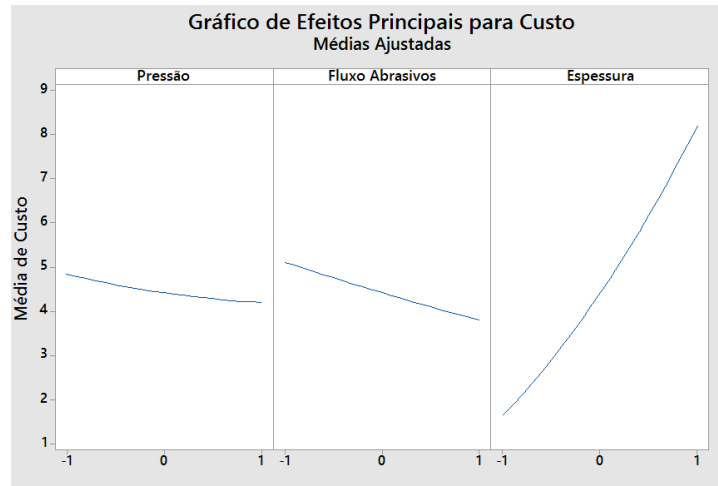
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	92,5437	10,2826	1599,17	0,000
Linear	3	90,1090	30,0363	4671,28	0,000
Pressão	1	0,8192	0,8192	127,40	0,000
Fluxo Abrasivos	1	3,4848	3,4848	541,96	0,000
Espessura	1	85,8050	85,8050	13344,48	0,000
Quadrado	3	0,9507	0,3169	49,28	0,000
Pressão*Pressão	1	0,0360	0,0360	5,60	0,064
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	1	0,0042	0,0042	0,65	0,455
Espessura*Espessura	1	0,9370	0,9370	145,72	0,000
Interação com 2 Fatores	3	1,4841	0,4947	76,93	0,000
Pressão*Fluxo Abrasivos	1	0,0056	0,0056	0,87	0,393
Pressão*Espessura	1	0,2352	0,2352	36,58	0,002
Fluxo Abrasivos*Espessura	1	1,2432	1,2432	193,35	0,000
Erro	5	0,0321	0,0064		
Falta de ajuste	3	0,0321	0,0107	*	*
Erro puro	2	0,0000	0,0000	*	*
Total	14	92,5759			

Sumário do Modelo

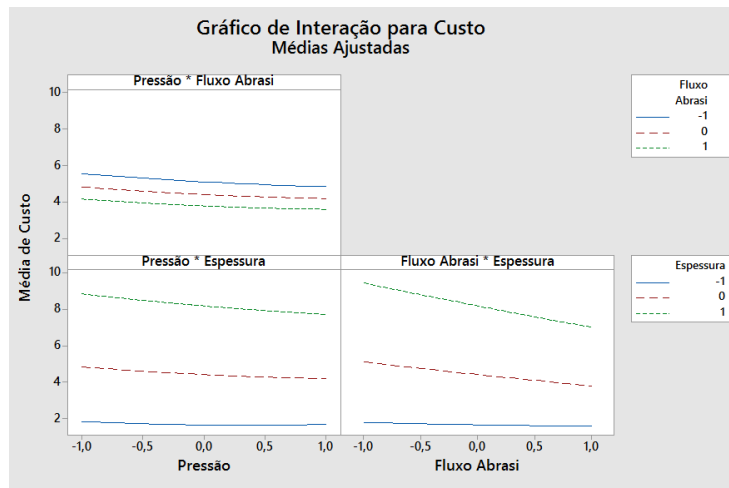
S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0801873	99,97%	99,90%	99,44%

Coefficientes Codificados

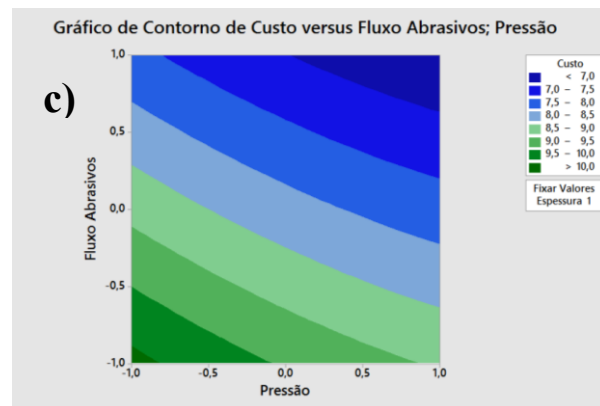
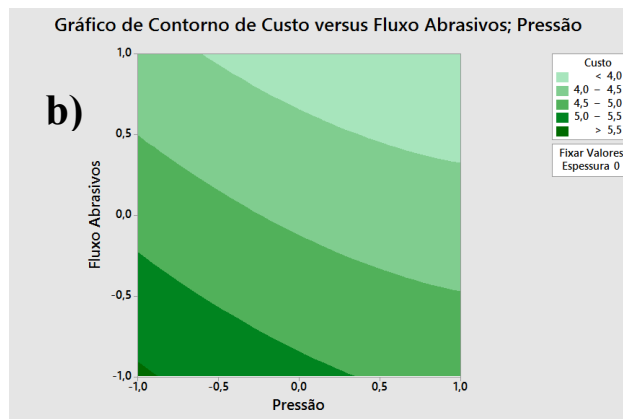
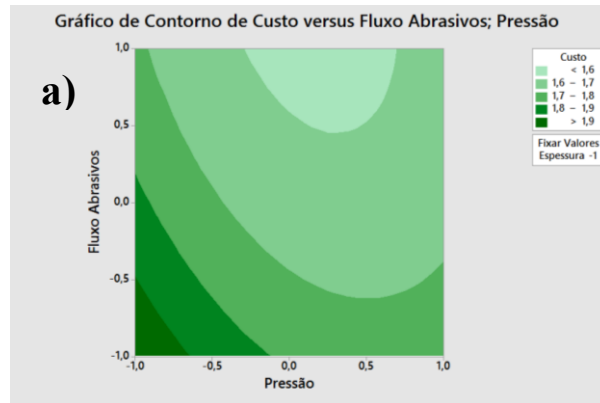
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	4,4200	0,0463	95,47	0,000	
Pressão	-0,3200	0,0284	-11,29	0,000	1,00
Fluxo Abrasivos	-0,6600	0,0284	-23,28	0,000	1,00
Espessura	3,2750	0,0284	115,52	0,000	1,00
Pressão*Pressão	0,0987	0,0417	2,37	0,064	1,01
Fluxo Abrasivos*Fluxo Abrasivos	0,0338	0,0417	0,81	0,455	1,01
Espessura*Espessura	0,5038	0,0417	12,07	0,000	1,01
Pressão*Fluxo Abrasivos	0,0375	0,0401	0,94	0,393	1,00
Pressão*Espessura	-0,2425	0,0401	-6,05	0,002	1,00
Fluxo Abrasivos*Espessura	-0,5575	0,0401	-13,90	0,000	1,00



Anexo 14: Gráficos de efeitos principais para a resposta Custo, material INOX



Anexo 15: Gráficos de interacção entre os diferentes parâmetros para a resposta Custo, material INOX.



Anexo 16: Gráficos de contorno para a resposta Custo em função dos parâmetros pressão e fluxo de abrasivos para espessura de a) 5mm, b) 12,5mm e c) 20mm, para o material INOX.

Anexo 17: Medições de kerf, comprimento e largura das peças maquinadas.

Ensaio		Largura (mm)								Comprimento (mm)								Kerf (°)								Valores Médios						
		x1	x2	x3	xmed	x'1	x'2	x'3	x'med	y1	y2	y3	ymed	y'1	y'2	y'3	y'med	ØX1	ØX2	ØX3	Øxmed	ØY1	ØY2	ØY3	Øymed	Ø	X	Y				
A	1	50,02	50,03	50,02	50,02333	50,24	50,24	50,23	50,23667	99,99	99,98	100	99,99	100,21	100,21	100,23	100,2167	0,787767	0,751964	0,751964	0,763898	0,787767	0,82357	0,82357	0,811636	0,787767	50,13	100,1033				
	2	49,99	50,01	50,03	50,01	50,21	50,23	50,24	50,22667	99,99	100	100,01	100	100,21	100,22	100,22	100,2167	0,787767	0,787767	0,751964	0,775833	0,787767	0,787767	0,751964	0,775833	0,775833	50,11833	100,1083				
	3	50	50,01	50,01	50,00667	50,24	50,23	50,25	50,24	99,97	99,98	99,99	99,98	100,23	100,24	100,24	100,2367	0,859372	0,787767	0,859372	0,835504	0,930974	0,930974	0,895174	0,919041	0,877272	50,12333	100,1083				
					50,01333					50,23444					99,99					100,2233					0,791745					0,835503	0,813624	50,12389
B	1	50,04	50,04	50,01	50,03	50,29	50,29	50,27	50,28333	100,02	100,02	100	100,0133	100,32	100,32	100,3	100,3133	0,895174	0,895174	0,930974	0,907107	1,07417	1,07417	1,07417	1,07417	0,990639	50,15667	100,1633				
	2	50,04	50,06	50,03	50,04333	50,31	50,32	50,29	50,30667	100,01	100,04	100,03	100,0267	100,32	100,32	100,34	100,3267	0,966775	0,930974	0,930974	0,942908	1,109967	1,002574	1,109967	1,074169	1,008538	50,175	100,1767				
	3	50	50,03	50,01	50,01333	50,22	50,24	50,24	50,23333	99,96	99,97	99,98	99,97	100,27	100,27	100,26	100,2667	0,787767	0,751964	0,82357	0,787767	1,109967	1,07417	1,002574	1,062237	0,925002	50,12333	100,1183				
					50,02889					50,27444					100,0033					100,3022					0,879261					1,070192	0,974726	50,15167
C	1	50,05	50,05	50,06	50,05333	50,31	50,34	50,35	50,33333	100,03	100,04	100,07	100,0467	100,3	100,33	100,34	100,3233	0,930974	1,038372	1,038372	1,002573	0,966775	1,038372	0,966775	0,99064	0,996607	50,19333	100,185				
	2	50	49,96	49,97	49,97667	50,27	50,28	50,3	50,28333	100,03	100	100,03	100,02	100,28	100,29	100,28	100,2833	0,966775	1,145763	1,181558	1,098032	0,895174	1,038372	0,895174	0,942907	1,020469	50,13	100,1517				
	3	50,01	50,04	50,01	50,02	50,29	50,28	50,26	50,27667	99,97	99,99	100	99,98667	100,26	100,25	100,28	100,2633	1,002574	0,859372	0,895174	0,91904	1,038372	0,930974	1,002574	0,99064	0,95484	50,14833	100,125				
					50,01667					50,29778					100,0178					100,29					1,006548					0,974729	0,990639	50,15722
D	1	50,03	50,05	50,04	50,04	50,26	50,27	50,29	50,27333	99,98	99,96	99,97	99,97	100,26	100,25	100,25	100,2533	0,82357	0,787767	0,895174	0,835504	1,002574	1,038372	1,002574	1,014507	0,925005	50,15667	100,1117				
	2	50	50,02	50,03	50,01667	50,26	50,25	50,26	50,25667	100	100,05	100,03	100,0267	100,27	100,28	100,27	100,2733	0,930974	0,82357	0,82357	0,859372	0,966775	0,82357	0,859372	0,883239	0,871305	50,13667	100,15				
	3	50,05	50,06	50,05	50,05333	50,28	50,29	50,3	50,29	99,99	100,03	100,02	100,0133	100,28	100,28	100,29	100,2833	0,82357	0,82357	0,895174	0,847438	1,038372	0,895174	0,966775	0,966774	0,907106	50,17167	100,1483				
					50,03667					50,27333					100,0033					100,27					0,847438					0,95484	0,901139	50,155
E	1	50,12	50,14	50,13	50,13	50,4	50,41	50,4	50,40333	99,99	100,01	100,01	100,0033	100,36	100,37	100,36	100,3633	1,002574	0,966775	0,966775	0,978708	1,324729	1,288938	1,253145	1,288937	1,133822	50,26667	100,1833				
	2	50	50,1	50,06	50,05333	50,3	50,28	50,3	50,29333	99,95	99,96	99,96	99,95667	100,29	100,25	100,27	100,27	1,07417	0,64455	0,859372	0,859364	1,217352	1,038372	1,109967	1,121897	0,990631	50,17333	100,1133				
	3	50,06	50,08	50,07	50,07	50,27	50,28	50,3	50,28333	99,96	100,01	100,03	100	100,32	100,31	100,33	100,32	0,751964	0,71616	0,82357	0,763898	1,288938	1,07417	1,07417	1,145759	0,954829	50,17667	100,16				
					50,08444					50,32667					99,98667					100,3178					0,867323					1,185531	1,026427	50,20556

